

## Tek Katmanlı Çelik Uzay Kafes Kubbe Sistemlerinin Yapısal Performansının İncelenmesi

Mehmet Sedat Hayalioğlu<sup>1</sup>, Mehmet Ali BEKTAŞ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye  
<sup>2</sup> Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Çetinkayalar Yapı Elemanları A.Ş., Diyarbakır, Türkiye  
<sup>1</sup> hsedat@dicle.edu.tr, <sup>2</sup> bektas1026@gmail.com

(Geliş/Received: 04/09/2023;

Kabul/Accepted: 27/03/2024)

**Öz:** Çelik kubbe sistemleri, geniş açıklıkları en az taşıyıcı eleman gereksinimi duyarak yapılan çatı örtü sistemleridir. Bu kubbe sistemlerinden biri olan tek katmanlı kubbe sistemleri, geometrik ve tasarımsal özelliklerinden dolayı farklı bir yapısal performans sergilemektedirler. Bu nedenle, gerilme dağılımını doğru bir şekilde anlamamız ve tasarımı buna göre yapmamız gerekmektedir. Bu makalede, tek katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin analizi ve tasarımı üzerine yapılan bir çalışmanın sonuçları sunulmaktadır. Eurocode-1 ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 esas alınarak yapıya etki eden yüklerin hesaplamaları ve AISC 360-10 yönetmeliğine uygun boyutlandırmalar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kritik gerilme oluşan çubukların kesit kontrolleri Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğine göre kontrol edilmiştir. Bulgular, kubbe sisteminin çember kirişlerinin etek bölgelerinde en yüksek çekme, tepe bölgelerinde ise en yüksek basınç gerilmelerine sahip olduğunu ve asimetrik yük altında çubukların farklı gerilmelere maruz kalabileceğini göstermektedir. Ayrıca AISC 360-10 ile Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğinin birbirine çok yakın ve benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışma, tek katmanlı kubbe sistemleriyle ilgilenen mühendisler için önemli bir rehber niteliği taşımakta olup, yapı tasarımında kubbe geometrisinden kaynaklanan çekme ve basınç gerilmelerinin göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Uzay kafes, nervürlü çelik kubbe, yapısal analiz, yapısal performans.

### Evaluation of Structural Performance of Single Layer Steel Space Lattice Dome Systems

**Abstract:** Steel dome systems are roof covering systems with wide spans that require minimum number of load-bearing elements. Single layer dome systems which is the one of these dome systems, exhibit a different structural performance due to their geometric and design features. Therefore, we need to understand correctly the stress distribution and design the systems accordingly. This article presents the results of a study on the analysis and design of a single-layer steel space lattice dome system. Based on the Eurocode-1 and Turkish Building Earthquake Code 2018, the calculations of the loads acting on the structure and the designs in accordance with the AISC 360-10 regulations were carried out, and then, the cross-sections of the bars with critical stresses were checked according to the Turkish steel structure regulations. The findings show that the circle beams of the dome system have the highest tensile stresses in the skirt regions and the highest compressive stresses in the apex regions, and that the bars can be subjected to different stresses under asymmetrical loads. In addition, it has been observed that AISC 360-10 and Turkish steel structure regulations give very close and similar results. This study is an important guide for engineers dealing with single-layer dome systems, emphasizing that tensile and compressive stresses arising from dome geometry should be taken into account in structural design.

**Key words:** Space truss, ribbed steel dome, structural analysis, structural performance.

#### 1. Giriş

Mimari tasarımın kalbinde, geniş açıklıklı yapıların tercih edilmesi ve yapısal elemanların azaltılması gibi prensipler yatmaktadır. Bu nedenle, mimarlar ve mühendisler, sürekli olarak geniş açıklıklı ve minimalistik yapı sistemlerinin potansiyelini keşfetmeye odaklanmaktadır. Bu öncelikler doğrultusunda, uzay kafes sistemleri özellikle ilgi çekici bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Uzay kafes yapılarının geniş açıklıklı ve aynı zamanda hafif olmaları, farklı yapı türlerinde kullanılmalarını teşvik etmektedir. Bu tür yapılar örneğin alışveriş merkezleri, tiyatrolar, stadyumlar, spor salonları, toplantı mekânları ve sanayi yapıları gibi çok çeşitli alanlarda geniş açıklıklı yapılara sıkça rastlamak mümkündür. Bu yapısal yaklaşımın temelinde, tasarımın işlevselliği, estetiği ve sürdürülebilirliği bir araya getirme düşüncesi bulunmaktadır. Geniş açıklıklı yapılar, iç mekânların daha esnek kullanılmasını sağlayarak farklı aktiviteler için uygun alanlar yaratırken, aynı zamanda yapıyı dış etkenlere karşı daha dayanıklı hale getirebilir. Örneğin, uzay kafes sistemleri, yapının dengeli bir şekilde yük dağıtmasını sağlar

\* Sorumlu yazar: [bektas1026@gmail.com](mailto:bektas1026@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9399-235X, <sup>2</sup> 0009-0008-9688-4491

ve böylece yapısal stabiliteyi artırır. Bunun yanı sıra, bu tür yapılar çevreye daha az etki eden yapım malzemeleri ve enerji tasarrufu sağlayabilir, böylece sürdürülebilir bir inşaat yaklaşımını destekler. Uzay kafes sistemlerinin kullanımı, mimarlık ve mühendislik alanındaki yenilikçi yaklaşımların bir yansımasıdır. Bu tür yapılar, karmaşık geometrilerin tasarım ve üretiminde ileri teknolojilerin kullanılmasını gerektirebilir. Bu durum, hem estetik hem de teknik açıdan farklılık yaratma potansiyeli sunar. Bu bağlamda, mimarlar ve mühendisler, geniş açıklıklı ve az elemanlı yapı sistemlerini kullanarak fonksiyonelliği, estetiği ve sürdürülebilirliği birleştirme amacıyla sürekli olarak yeni çözümler arayışındadır. Sonuç olarak, mimari tasarımın evrimi, geniş açıklıklı yapıların ve az elemanlı sistemlerin önemini vurgulamaktadır. Uzay kafes sistemleri, bu yaklaşımın özümsemiği ve farklı yapı türlerinde başarıyla uygulandığı bir örnektir. Bu tür yapılar, işlevselliği, estetiği ve sürdürülebilirliği dengeli bir şekilde bir araya getirerek geleceğin yapılarına yön vermektedir.

Tarihsel olarak, kubbe sistemleri mimarlar ve mühendisler tarafından çelik elemanlarının kullanılmadığı dönemlerde farklı yöntemlerle tercih edilmiştir. İlk kubbe sistemleri taş, tuğla ve ahşap gibi malzemelerden oluşturulmuş ve daha sınırlı açıklıklara sahip olarak inşa edilmiştir. Örneğin, MS 120 yılında İmparator Hadrian tarafından Roma'da inşa edilen Pantheon Tapınağı, tarihteki önemli kubbe örneklerinden biridir. Bu tapınakta kullanılan kubbe, daire planlı bir yapı üzerine oturtulmuştur. Daha sonraları, gelişmiş harçlar ve çeşitli yapı malzemelerinin kullanımıyla daha geniş açıklıklı kubbeler tasarlanmıştır.

Kubbe sistemlerinin evrimi, malzeme teknolojilerinin ilerlemesiyle paralel olarak gerçekleşmiştir. Betonarme kubbeler, daha geniş açıklıklı olmalarına rağmen inşaat süresini uzatma ve yapının ağırlığını artırma gibi nedenlerle çelik kubbelerin tercih edilmeye başlanmasının ardından, çelik endüstrisinin gelişmesiyle birlikte öne çıkmıştır. Çelik kubbeler, hafiflikleri, düşük maliyetleri ve imalat kolaylıkları nedeniyle mühendisler için daha çekici hale gelmiştir. Uzay kafes sistemleri ise farklı şekil ve yapı oluşturma sistemlerine sahiptir. Bunlardan biri de kubbesel uzay kafes sistemleridir. Bu sistemler, döneleli yüzeyler üzerine yerleştirilen eliptik yay veya tek eğrilikli çubuk sistemlerinden oluşmaktadır.

Bu çalışmada, tek katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin analizi ve tasarımı yapılmıştır. Bu sistem, tek katmanlı bir çelik ağ örgüsünden oluşur ve bu benzersiz yapı, hem yüksek dayanıklılığı hem de estetik görünümü bir araya getirir. Kubbenin geometrisi, yüksek taşıma kapasitesini sağlarken iç mekânlarda geniş ve sütunsuz bir kullanım alanı sunar. Çalışma kapsamında, öncelikle belirlenen konum ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak Eurocode yönergelerine uygun şekilde ölü yük, kar yükü [1] ve rüzgâr yükü [2] hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve bu yükler SAP2000 programında tanımlanmıştır. Bu hesaplamalar, yapıya etki eden dışsal yükleri belirlemeye yardımcı olmuştur. Daha sonra, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e [3] uygun olarak deprem yükü de hesaba katılmıştır. Deprem yükü hesaplamaları, yapıya depremden kaynaklanan etkileri değerlendirmeye yönelik tasarım önlemleri almayı sağlamıştır. Sonrasında ise, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğine (ÇYTHYE-2018) büyük ölçüde benzeyen [4] AISC 360-10 [5] yönergeleri kullanılarak kubbenin elemanları boyutlandırılmıştır. Bu adım, yapı elemanlarının uygun boyutlara sahip olmasını ve taşıma kapasitelerini karşılamasını sağlamak için atılmıştır. Son olarak, elde edilen kubbe modelinin yük dağılımı ve kritik yük bölgeleri incelenmiştir. Bu analizler, kubbenin geometrisinden kaynaklanan önemli bilgileri ortaya çıkarmış ve yapısal tasarımın daha da geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

Öncelikle, tasarım işlemi AISC 360-10 yönetmeliğine uygun olarak gerçekleştirilmiş ve SAP2000 yazılımı kullanılarak kesit elemanları boyutlandırılmıştır. Bu boyutlandırma sonucunda, kritik elemanlar belirlenmiş ve tasarım süreci tamamlanmıştır. Daha sonra, ÇYTHYE-2018'in öngördüğü kesit kontrol kriterleri kullanılarak, belirlenen kritik elemanların kesit kontrolleri yapılmıştır. Bu adım, tasarımın yerel standartlara uygunluğunu ve yapıya dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Son olarak, AISC 360-10 yönetmeliğine göre yapılan tasarım ve ÇYTHYE-2018'e göre yapılan kesit kontrol sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, yapı elemanlarının boyutlandırılmasında ve kesit kontrollerinde farklılıkların olup olmadığını göstermektedir. Bu aşama, tasarımın güvenilirliği ve yapısal bütünlüğünün sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Bu araştırma, iki ayrı tasarım yönetmeliği kullanılarak yürütülen tasarım süreçlerinin sonuçlarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu inceleme, farklı tasarım standartlarının nasıl farklı sonuçlara neden olduğunu anlamamıza yardımcı olacak ve tasarım süreçlerini daha etkili bir şekilde optimize etme imkânı sunacaktır. Elde edilen sonuçlar, her iki tasarım yaklaşımının avantajlarını ve kısıtlamalarını anlamamızı sağlayarak gelecekteki projelerde daha iyi kararlar vermeme katkıda bulunacaktır. Ayrıca, tek katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin ayrıntılı analiz ve tasarım sürecini ayrıntılı bir biçimde ele almaktadır. Elde edilen sonuçlar, benzer yapıların tasarımı ve inşasıyla ilgilenen mühendisler ve araştırmacılar için son derece değerli bir kaynak sunmaktadır. Bu sonuçlar, farklı tasarım seçeneklerinin ve yaklaşımlarının nasıl gerçek dünyada işlediğini

anlamamıza yardımcı olarak, gelecekteki projelerde daha bilinçli ve etkili kararlar alabilmemizi sağlayacaktır. Ayrıca, çelik yapıların kullanıldığı çeşitli uygulama alanlarında daha sağlam, güvenli ve dayanıklı yapılar inşa etmek isteyenler için bu çalışmanın sunduğu yöntemler ve sonuçlar önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.

Çelik kubbelerin analizi konusunda yürütölen önemli çalışmalardan bazıları aşığıda sıralanmıştır: Örneğin, Timoshenko ve Woinowsky-Kriger [6] "Plak ve Kabukların Teorisi" kitabında, kubbe sistemlerindeki gerilmelerin dağılımı ve deplasman tespiti için kullanılan hesap yöntemlerini ayrıntılı bir şekilde açıklamışlardır. Benzer şekilde, Timoshenko [7], "Elastik Burkulma Teorisi" adlı kitabında, kabuk elemanlarının burkulma sorununa yönelik çeşitli çözümler sunmuş ve bu elemanların maksimum yük noktasından önce dahi burkulabileceğini göstermiştir. Papadopoulos ve LoRicco [8] Bükreş Ulusal Ekonomi Köşkü'nün çelik kubbesinin burkulma ve ters dönme sorunlarını inceleyerek, özellikle düzensiz dağılmış kar yüklerinin bölgesel burkulmaya neden olabileceğini açıklamışlardır. Soykan [9], farklı eğrilik formlarına sahip kubbelerin stabilitesini, deplasmanlarını ve birim alan ağırlıklarını karşılaştırmalı bir şekilde analiz ederek değerli bilgiler sunmuştur. Çiftçi [10], uzay kubbe sistemlerindeki geometrik deformasyon ve doğrusalsızlığın stabilite üzerindeki etkilerini belirleyerek, bu tür yapıların davranışını anlamamıza katkı sağlamıştır. Karabulut [11], geniş açıklıklı uzay kafes çatı sistemlerinin boyutlandırılması ve tasarım esaslarını ele alarak, bu yapıların performansını detaylı bir şekilde değerlendirmiştir. Aynı şekilde, Kara [12], farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip tek katmanlı kubbelerin performansını ve maliyet analizlerini karşılaştırarak önemli sonuçlara ulaşmıştır. Özcan [13], asimetrik yüklerden kaynaklanan stabilite sorunlarını ele alarak nervürlü ve schwedler tipi kubbelerin davranışını incelemiş ve farklı tasarımların performansını karşılaştırmıştır. Yılmaz [14], tek katmanlı kubbe sistemlerinin stabilitesini kiriş berkitmeleri kullanarak analiz ederek, bu tür yapıların optimize edilmiş bir şekilde tasarlanmasının potansiyelini göstermiştir. Adnanoğlu [15], ekonomik ve dayanıklı kubbe tasarımları için ribbed ve schwedler kubbe sistemlerini parametrik olarak araştırarak önemli bir katkı sağlamıştır. Wang ve Jiang [16], farklı tasarım stillerine sahip küresel yapıların rüzgâr yüklerini sistematik olarak analiz ederek, tasarım önerileri sunmuşlardır. Son olarak, Bektaş [17], farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip tek katmanlı ve çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sistemleri oluşturarak, bu yapıları AISC-360-10 yönetmeliğine göre tasarlayıp ÇYTHYE-2018'e göre kontrol ederek iki yönetmeliğin sonuçlarını karşılaştırmış ve benzer sonuçlar elde etmiştir.

Tüm bu hususlar göz önüne alındığında, bu çalışma aynı zamanda çelik kubbelerin analizi konusundaki gelecekteki araştırmalara da katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu çalışmanın elde ettiği bulgular, bu alanda ileriye yönelik daha fazla bilgi ve anlayışın oluşturulmasına katkı sağlayabilir ve gelecekte yapılacak projelerin daha güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde tasarlanmasına temel oluşturabilir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Kubbesel uzay kafes sistemlerinin sınıflandırılması

Kubbesel uzay kafes sistemleri, taşıyıcı elemanların ve düğüm noktalarının bir araya gelerek oluşturduğu ve yükleri tüm çubuklara etkin bir şekilde dağıtan örtü sistemleridir. Bu sistemler, tasarımın doğasına bağlı olarak farklı alt tiplere ayrılabilir. Kubbesel uzay kafes sistemlerinin farklı ana tasarım tipleri şunlardır:

1. Radyal Nervürlü Kubbe Sistemleri: Radyal nervürlü kubbe sistemleri, dikey ekseninde dönen radyal kemerlerle tasarlanır. Bu kemerler, çubuk elemanların keşiştiği düğüm noktalarında birleşir. Bu tür kubbeler genellikle küçük açıklıklı alanlarda kullanılırken, montaj kolaylığı ve maliyet avantajı sunar. Ancak büyük açıklıklar için daha büyük kesitlere ihtiyaç duyulabileceğinden maliyet ve montaj zorlukları ortaya çıkabilir.
2. Schwedler Kubbe Sistemleri: Schwedler kubbe sistemleri, simetrik olmayan yükleri güvenle taşıyabilmesi için diyagonal nervürleri kullanan bir tasarımı temsil eder. Bu tür kubbeler, büyük açıklıklara sahip yapılarda tercih edilir. Diyagonal nervürlerin yanı sıra yatay halkalar ve yay kirişleriyle desteklenirler. Bu tasarım, yük transferini etkinleştirir ve nervür kirişlerini birleştiren eř merkezli halkaların güvenliğini artırır.
3. Lamella Kubbe Sistemleri: Lamella kubbe sistemleri, kubbenin çubuk yaylarını eşkenar dörtgenlere benzeyen lamella levhalarla birleştirerek oluşturur. Lamella levhaları kubbenin yüzeyinde bulunur ve stabiliteyi artırır. Alt kısımda çekme çemberi, üst kısımda basınç çemberi yer alır ve gerilmelerin dağıtılmasını sağlar. Lamella kubbeler, yüksek rüzgâr yüklerine karşı dayanıklıdır ve geniş açıklıklı yapılarda kullanımı uygundur.
4. Jeodezik Kubbe Sistemleri: Jeodezik kubbe sistemleri, kiriş ve düzlemlerin geometrik şekillerle birleştiği bir yapıya sahiptir. Bu tasarım, kemer sistemleri yerine jeodezik yapıları kullanır. Küresel kubbe formları yaygın olup yükü kendi içinde dağıtarak taşıma işlevini gerçekteştirir. Kubbe alt halkası farklı taşıyıcı elemanlara

veya zemine yerleştirilebilir. Jeodezik kubbeler, montaj kolaylığı nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir.

5. Üç Doğrultuda Izgara Kubbe Sistemleri: Bu sistemler, çubuk elemanların eşit geometrilerle birleştiği bir tasarımı yansıtır. Kubbenin ana kirişleri ile birbirine bağlanan ve ikincil çubuk elemanlarıyla desteklenen bir yapı oluşturulur. Bu sayede yükler homojen bir şekilde dağıtılır. Üç doğrultuda ızgara kubbeler, farklı geometrik formlara sahip olabilir ve hem ağırlık hem de alan dağılımı açısından etkili bir tasarım sunar. Büyük açıklıklı yapılar için ideal bir seçenektir.

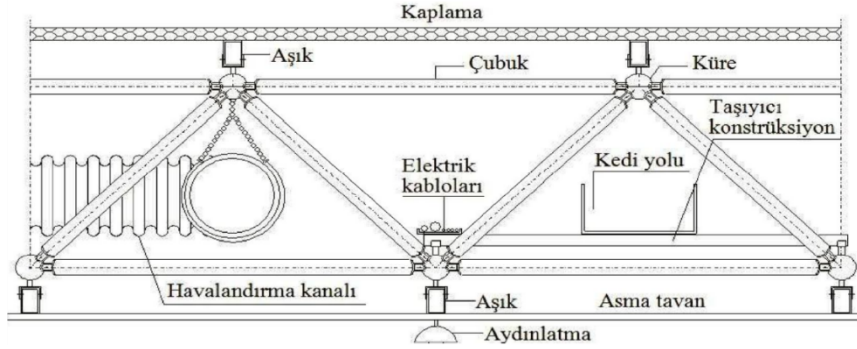
Tüm bu farklı kubbesel uzay kafes sistemleri, tasarım gereksinimlerine ve yapısal performansa bağlı olarak tercih edilir. Her bir sistem, belirli bir açıklık veya yük taşıma gereksinimini en iyi şekilde karşılamayı amaçlar.

## 2.2. Kubbesel Uzay Kafes Bileşenleri

Uzay kafes sistemleri, karmaşık bir yapıya sahip olup, çeşitli temel bileşenlerden oluşur. Bu bileşenler, sistemin sağlamlığını ve işlevselliğini sağlamak üzere bir arada çalışır. Kubbesel uzay kafes sistemlerinin bileşenleri ve bu bileşenlerin detayları şu şekildedir:

1. Çubuklar: Uzay kafes sistemlerindeki en temel taşıyıcı elemanlardan biridir. Yükleri taşıma işlevini üstlenen ve iki düğüm noktasını birbirine bağlayan çubuk elemanları, farklı malzemelerden üretilebilir. Genellikle çubuk elemanlarının dairesel kesitleri tercih edilse de, T, I, L, U ve kare gibi farklı kesit şekilleri de kullanılabilir. Çubuk elemanlarının boyutları, malzemesi ve şekli, sistemin taşıma kapasitesini ve performansını etkiler.
2. Düğüm Noktaları: Çubuk elemanlarının kesişim noktalarını oluşturan ve taşıma sistemini bir arada tutan önemli parçalardır. Düğüm noktaları, çubukların birleştiği ve yüklerin dağıtıldığı bölgelerde bulunur. Çubukların bağlantıları, düğüm noktalarının geometrisine ve yüklere maruz kalma durumuna göre tasarlanır. Tasarım şekline göre moment aktaran ve moment aktarmayan olmak üzere iki şekilde tasarlanır. Tek katmanlı kubbe yapılarında moment aktaran çift katmanlı sistemlerde ise moment aktarmayan olarak tasarlanmaktadır. Bu noktaların sağlam ve stabil olması, sistemin genel güvenilirliği açısından kritiktir. Şekil 1’de çift katmanlı ve moment aktarmayan bir uzay kafes sisteminin düğüm noktaları gösterilmiştir.
3. Mesnetler: Uzay kafes sistemlerinin ana taşıyıcı elemanlarını zemine veya diğer yapı elemanlarına bağlayan bileşenlerdir. Mesnetler, yüklerin güvenli bir şekilde aktarılmasını sağlayarak sistemin dayanıklılığını destekler. Mesnet tipleri, yapısal gerekliliklere göre değişebilir. Doğrudan zemine oturan sistemlerde mesnetler, zeminle bağlantıyı sağlar ve yük transferini yönetir.
4. Örtü Gereçleri: Kubbesel uzay kafes sistemlerinin montajı tamamlandıktan sonra üzerini kaplayan ve sistemle dış etkenler arasında bir bariyer görevi gören elemanlardır. Bu gereçler, yapıya gereksiz yük eklememek için hafif olmalı ve aynı zamanda çeşitli hava koşullarına karşı dayanıklı olmalıdır. Isı ve ses yalıtımı gibi ek özelliklere sahip olabilirler.
5. Temeller: Uzay kafes sisteminin zemine oturan kısmıdır ve tüm yükünü zemine ileten bileşenlerdir. Kubbenin tipine, büyüklüğüne ve taşıdığı yüke göre farklı şekil ve boyutlarda tasarlanabilirler. Temellerin doğru bir şekilde tasarlanması, sistemin yüklere karşı dayanıklılığını ve stabilitesini sağlar.
6. Yardımcı Elemanlar: Uzay kafes sistemi tasarımı ve kullanım gereksinimlerine göre çeşitli yardımcı elemanlar kullanılabilir. Bu elemanlar, çubukların birleşim yerlerini güçlendiren, malzeme özelliklerini optimize eden veya yapıya ek işlevler kazandıran bileşenler olabilir. Havalandırma sistemleri, yangın koruma sistemleri, ses yalıtımı, aydınlatma, elektrik tesisatı gibi çeşitli yardımcı elemanlar sistemin performansını artırabilir.

Bu bileşenler, kubbesel uzay kafes sistemlerinin başarılı bir şekilde tasarlanması ve uygulanmasında merkezi bir rol oynar. Her bir bileşen, sistemin güvenli, dayanıklı ve işlevsel bir şekilde çalışmasını sağlar. Uzay kafes sistemlerinde kullanılan bu bileşenler, tasarım esnasında ve uygulama aşamasında büyük önem taşır. Şekil 1, bu bileşenleri daha ayrıntılı bir şekilde göstermektedir.



Şekil 1. Çelik uzay kafes bileşenleri [9]

### 2.3. Kubbesel Örtü Sistemlerin Yapısal Davranışı

Kubbesel yapı sistemlerinin yapısal davranışı, hem yapıda kullanılan malzemelerin özelliklerine hem de kubbenin geometrisine bağlı olarak çeşitlilik gösterir. Yapısal davranışların anlaşılması, bu sistemlerin tasarımı ve malzeme seçiminde büyük bir öneme sahiptir. Kubbesel örtü sistemlerinin yapısal davranışını tam anlamıyla kavrayabilmek adına farklı malzemelerin ve sistemlerin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Aşağıda, kubbesel örtü sistemlerinin yapısal davranışını yansıtan 7 ayrı gruba dair geniş bir perspektif sunulmuştur:

1. Yığıma kubbeler: Bu tip kubbelerde genellikle taş veya tuğla gibi dayanıklı kâgir malzemeler kullanılır. Yapının altındaki yükleri taşıma kapasitesi yüksektir; ancak, çekme kuvvetleri statik açıdan endişe kaynağı olabilir. Bu sorun, yanal dikme payandaları, yarım kubbeler veya uçan payandalar gibi yapısal ayarlamalarla ele alınabilir.
2. Kabuk kubbeler: Betonarme malzemeden inşa edilen bu kubbelerde, yükler üst bölgelerde basınç ve alt bölgelerde çekme gerilmeleri şeklinde dağılır. Alt bölgelerdeki çekme gerilmeleri, çelik donatılarla güçlendirilerek dengelenir.
3. Kemer taşıyıcılı kubbeler: Bu tür kubbelerde merkezde birleşen bir basınç halkası yoktur; bunun yerine kubbe kemerleri paralel olarak tasarlanır. Örneğin, Oita Stadyumu gibi büyük açıklıklı kemer taşıyıcılı kubbeler bu kategoriye örnek verilebilir.
4. Kaburgalı kubbeler: Kaburga ve kaburga dilimlerinin bir araya geldiği kubbeler olarak kabul edilir. Kaburgalar vasıtasıyla yükler çemberin eteğinden iletilir. Tarihi eserlerde sıkça kullanılan örneklere Floransa Katedrali gibi rastlanabilir. Bu tür kubbeler yüksek dayanıklılık gerektiren alanlarda tercih edilir ve farklı tasarım seçenekleri sunar.
5. Çubuk ağı kubbeler: Kubbe yüzeyi çubuk ağları ve düğüm noktalarıyla farklı geometrik formlara ayrılarak oluşturulan bu tür kubbeler, nervürlü, schwedler, lamella, jeodezik, üç doğrultulu sistemler gibi varyasyonlar içerir. Gerilmeler, çubuk ağları boyunca eşit bir şekilde zemine iletilir.
6. Kablo sistemli kubbeler: Çekme gerilimine karşı dayanıklı çelik kablolarla desteklenen sistemlerdir. Kubbe yükleri, kablolar aracılığıyla dikey taşıyıcı sistemlere aktarılır. Bu şekilde kubbe sistemleri çelik kablolarla güçlendirilir.
7. Pnömatik kubbeler: Basınçlı hava ile gerilmeye sahip membran yüzeyler kullanılarak ayakta tutulan bu tür sistemler, yalnızca çekme gerilimine karşı direnç gösterir. Hava basıncı, üst yüzeydeki membranın stabilitesini sağlayan kabloların yardımıyla bu kubbeleri destekler.

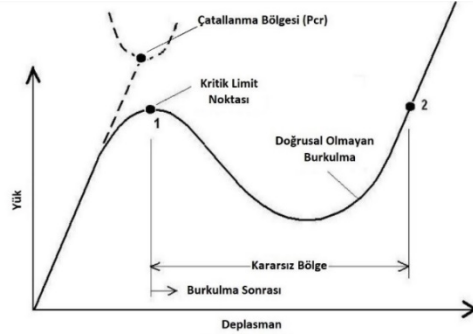
Yukarıda sıralanan 7 farklı grup, kubbesel örtü sistemlerinin yapısal davranışını ifade eder ve malzeme seçimine, geometriye ve sistem tasarımına bağlı olarak değişiklik gösterir. Kubbenin yapısal davranışının kavranması, doğru tasarımın gerçekleştirilmesi ve güvenli bir uygulama için kritik bir öneme sahiptir.

### 2.4. Çelik Kubbe Sistemlerinin Stabilitesi

Çelik kubbe sistemlerinde stabilite meselesi, tasarım sürecinde büyük bir öneme sahiptir. Özellikle burkulma davranışı, kafesli yapıların dayanıklılığı için hayati bir faktördür. Bu tür yapılar, çubuklar veya bağlantı elemanları arasındaki lineer olmayan özelliklerden dolayı aşırı yükler altında istikrarsız hale gelebilirler. Burkulma genellikle düzlem içi basınç kuvvetlerinin etkisiyle ortaya çıkar ve genellikle malzeme mukavemetinden çok yapısal istikrarsızlık nedeniyle meydana gelir. Bu nedenle, yapının yük altında dahi görünürde sağlam olsa bile burkulma

analizi yapılmalı ve gerektiğinde elemanların veya kafesin stabilitesi artırılmalıdır. Bunu sağlamak için kafes yüksekliği veya malzeme atalet momenti gibi tasarım faktörleri ayarlanabilir.

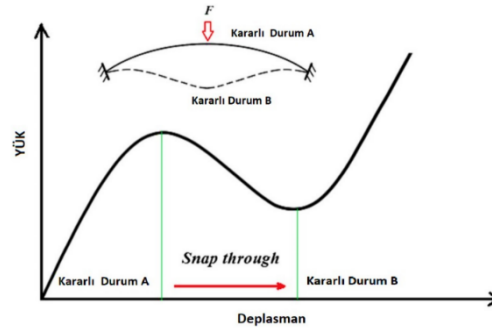
Özellikle kafes sistemlerinde bir elemandaki burkulma davranışı, beklenmedik genel çökme olaylarına yol açabilir. Bu nedenle, eleman burkulmasının sistemsel dayanıklılık üzerinde büyük bir etkisi olduğu söylenebilir. Şekil 2'deki grafik incelendiğinde, burkulma davranışının doğrusal olmayan ve "çatallanma burkulması" olarak adlandırılan bir model izlediği görülür. Bu davranış, elastik sınırların ötesine geçildiğinde ani bir şekilde meydana gelir. Çatallanma bölgesinde, eleman zayıf bölgesine doğru deforme olur. Bu aşamada yapı elemanı kararsız hale gelir ve deplasman yönüne doğru doğrusal olmayan bir burkulma eğrisi çizer. Bu değişim hızlı ve ani bir şekilde gerçekleşebilir. Özellikle yüzey eğriliğine sahip kubbe ve tonoz gibi yapı sistemlerinde, örtü sistemi ters yönde burkulup tamamen çökebilir. Bu nedenle, kubbe ve tonoz yapılarında yükseklik/açıklık oranının burkulmaya karşı en az etkileyecek şekilde tasarlanması tavsiye edilir.



Şekil 2. Nonlineer ve çatallanma burkulma davranışı grafiği [18]

Kubbe sisteminin yapısal burkulma davranışı yakından incelendiğinde, yapı elemanının kararlı bir durumdan kararsız bir duruma geçişinin önemli bir davranış biçimi olduğu gözlenir. Şekil 3'te sunulan grafik, bu geçişi görselleştirirken, kararlı A noktasından kararsız B noktasına kadar olan kritik bölgenin belirgin bir şekilde işaret edildiğini gösterir. Bu bölge, sistem kararlılığını kaybettiği ve yapının burkulma eğiliminin ortaya çıktığı yerdir. Kritik bölgeye gelene kadar, sisteme uygulanan yükler nedeniyle enerji birikir. Ancak, kritik yük eşiği aşıldığında, biriken enerji serbest bırakılır. Bu süreç, elemanın kararsız hale gelip dönme hareketi gerçekleştirmesiyle sonuçlanır. Bu şekil değişimi, hızlı ve ani bir şekilde gerçekleşebilir. Yani, yapı elemanı, daha önce kararlı bir denge halinde bulunduğu konumdan, aniden kararsız bir konuma geçer. Bu burkulma davranışı, kubbe sistemlerinin belirgin bir özelliğini temsil eder. Bu tür yapılar, genellikle yük altındayken bu tür burkulma davranışlarını sergileyebilirler. Bu nedenle, tasarım aşamasında bu kararsızlık durumları dikkate alınmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır. Yapı elemanlarının veya sistemin genel stabilitesinin artırılması için tasarım parametreleri ayarlanabilir. Bu şekilde, kubbe sistemi burkulma ve istikrarsızlık sorunlarına karşı daha dayanıklı hale getirilebilir.

Çelik kafes sistemlerinde meydana gelen burkulma davranışı, yapının yapısal sağlamlığı ve dayanıklılığı açısından kritik bir faktördür. Bu davranış, düğüm noktalarının serbestlik derecelerinin büyük ölçüde etkilediği bir süreçtir. Düğüm noktalarında yeterli rijitlik sağlanamadığı veya elemanlar eksenel gerilme dışındaki moment ve kesme kuvvetlerine uygun bir şekilde tasarlanmadığı durumlarda, eleman burkulma davranışı gösterebilir.



Şekil 3. Tersine dönerek burkulma davranışında yük-deplasman grafiği [19]

Bu tür burkulma kararsızlıkları, tasarım aşamasında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bu analiz iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir: lineer ve doğrusal olmayan burkulma analizi. Lineer burkulma analizi, elastik

yapıda burkulma dayanımını ve çatallaşma noktalarını belirlerken, doğrusal olmayan burkulma analizi, elemanın en kararsız hale geldiği noktayı bulur ve gerçeğe en yakın kritik yükü tahmin etmek için kademeli yük artışını sağlar. Burkulma sonrası stabilite kaybı ve sistem stabilitesi gibi faktörler, genellikle doğrusal olmayan burkulma analiziyle belirlenebilir.

Kubbe sistemlerinde eleman burkulması, genellikle tek bir elemanın etkilenmesiyle başlar ve ardından yapının daha geniş bir bölgesine yayılabilir. Bu, yapı geometrisini etkileyebilir ve yerel veya global burkulma kararsızlığını tetikleyebilir. Bu hassas durum nedeniyle, burkulma boyunun azaltılması veya atalet momentinin artırılmasıyla kritik yüke maruz kalan elemanın burkulma davranışı önemli ölçüde azaltılabilir. Ancak, burkulma davranışını etkileyen kesit dışındaki diğer faktörleri göz ardı etmemek önemlidir. Özellikle birleşim elemanlarının eksantrik yük iletimine neden olan kusurları, burkulma davranışını ciddi şekilde etkileyebilir. Bu nedenle, dikkatli bir tasarım ve uygulama gereklidir. Eleman burkulması için Euler Burkulma teorisi kullanılarak kritik yük tespit edilebilir. Bu teori, elastisite modülü, etkili uzunluk, burkulma boyu katsayısı ve atalet momenti gibi faktörleri dikkate alarak kritik yükü hesaplar.

Kubbe sistemlerinde yerel burkulma davranışı da sıkça görülür. Özellikle tek katmanlı kubbelerde bu davranış daha yaygındır ve genellikle düğüm noktalarından kaynaklanır. Kubbe düğümlerinde bulunan içten asılı aydınlatma ve havalandırma gibi elemanlar, yerel burkulma davranışına neden olabilir. Bu tür elemanların kubbe düğümlerinde yarattığı yoğun tekil yük, burkulma davranışını tetikleyebilir. Ayrıca, yerel burkulma davranışı tersine dönerek burkulma (snap-through) olarak da ortaya çıkabilir. Bu durum, bölgesel veya sistemin tamamının tersine dönerek burkulması şeklinde gerçekleşebilir. Tersine dönerek burkulma, sistem stabilitesini etkileyebilir ve farklı gerilmelerin oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, yapısal tasarım ve analiz sürecinde yerel burkulma davranışının öngörülmesi ve önlenmesi kritik öneme sahiptir.

Global burkulma davranışı ise bir yapının toptan göçmesine neden olabilen ciddi bir kararsızlık durumunu ifade eder. Özellikle çift eğrilikli sistemlerde, tek eğrilikli sistemlere göre daha fazla global kararsızlık görülür. Bu tür sistemlerin yük taşıma kapasiteleri daha yüksek olabilir, ancak yapısal simetri bozulduğunda global burkulma davranışı artar. Dış etkenler, simetri bozuklukları, yük dağılımları gibi faktörler, bu davranışın ortaya çıkmasında etkili olabilir. Global burkulma davranışını etkileyen yapısal hatalar da göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, çelik kafes sistemlerinde burkulma davranışı, tasarım aşamasında dikkate alınması gereken karmaşık bir konudur. Yapının stabilitesini sağlamak için burkulma analizi yapılmalı, eleman veya sistem stabilitesi artırılmalı ve yerel/global burkulma davranışı dikkatlice yönetilmelidir. Doğru tasarım ve analiz süreci, bu tür kararsızlıkların kontrol altına alınmasını ve yapısal güvenliğin sağlanmasını sağlar.

## 2.5. Kubbesel Uzak Kafes Tasarım Ve Analizi

Bu araştırma kapsamında, tek katmanlı kubbe modelinin analiz ve tasarımı detaylı bir şekilde yapılmıştır. Uzak kafes sistemlerinin ticari veya akademik çalışmalar sırasındaki analizleri için geniş bir yelpazede bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Bu yazılımlar, ilgili yönetmeliklere uygun olarak hesaplama metodlarını yapılandırabilme yeteneğine sahiptir. Genelde, bu yazılımlar yapısal analizleri gerçekleştirmek için sonlu eleman yöntemini kullanırlar. Her organizasyon, kendi yapısal analiz ihtiyaçlarına uygun farklı bilgisayar yazılımlarını tercih edebilir. Uzak kafes sistemlerinin analizinde sıkça tercih edilen yazılımlardan biri SAP2000 programıdır. Bu çalışma kapsamında incelenen sistem modellerinin analiz ve tasarım süreçleri SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu program, üç boyutlu doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz yeteneklerinin yanı sıra yapısal elemanların tasarımını kolaylaştıran özellikler de içerir. Ayrıca, farklı ülkelerin standartlarına uygun olarak çözümler üretme kapasitesine sahiptir.

Tasarım aşamasında, Türk standartlarına uygun tasarım ilkeleri uygulanmıştır. Çelik yapıların tasarım ve hesaplamaları, Yük ve Dayanım Katsayıları İle Tasarım (YDKT) veya Güvenlik Katsayıları İle Tasarım (GKT) prensipleri temel alınarak yapılır. YDKT prensibine göre, çelik yapıların taşıma kapasiteleri yük ve dayanım katsayılarına göre tasarlanırken, GKT prensibinde ise güvenlik gerilmelerine dayalı bir tasarım yaklaşımı benimsenir. Bu makale çalışmasında çelik kubbe tasarımında YDKT yöntemi tercih edilmiştir.

Yük kombinasyonları, farklı yük türlerinin bir araya getirilmesi ile elde edilen karakteristik yüklerdir. Bu karakteristik yükler arasında G (Sabit Yük), Q (Hareketli Yük), S (Kar Yüğü), W (Rüzgâr Yüğü) ve E (Deprem Etkisi) bulunmaktadır. YDKT prensibi gereğince, tasarım katsayısı ile çarpılmış tasarım dayanımı, öngörülen yük veya yük kombinasyonlarına göre hesaplanan karakteristik dayanım değerine eşit veya daha büyük olmalıdır. Bu prensip,  $R_u \leq \Phi R_n$  şeklinde ifade edilir. Burada  $R_u$ , YDKT kombinasyonları altında hesaplanan dayanımı;  $R_n$ , karakteristik dayanımı;  $\Phi$  ise tasarım dayanımı katsayısını temsil eder.

Tasarım katsayısı ile çarpılmış tasarım dayanımı, ÇYTHYE-2018'de belirtilen YDKT yük kombinasyonları kullanılarak belirlenir. Bu yük kombinasyonları, farklı sistem kombinasyonları ve yapısal etkiler göz önünde bulundurularak tasarım dayanımını belirlemek amacıyla kullanılır. Aynı şekilde, taşıyıcı elemanların deplasman kontrolü için kullanılabilir sınır durumları altında çatı sistemlerinin düşey yer değiştirmeleri hesaplanmalıdır. Yatay yer değişim durumunda ise kaplama malzemesi sehim durumuna göre değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, bu makale çalışmasında tek katmanlı kubbesel uzay kafes sistemleri detaylı bir şekilde tasarlanmış, analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Tasarım aşamasında Türk standartlarına uygun prensipler ve YDKT yöntemi uygulanmıştır. Yük kombinasyonları ve tasarım dayanımı katsayıları, ÇYTHYE-2018'de belirtilen tablolara göre belirlenmiştir. Analiz ve tasarım süreçlerinde SAP2000 programı tercih edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, kubbesel uzay kafes sistemlerinin sağlam, güvenli ve istikrarlı bir şekilde tasarlanması ve değerlendirilmesi sağlanmıştır.

## 2.6. Tek Katmanlı Kubbe Modeli Analizi

Tek katmanlı kubbe sistemleri, yapı tasarımında özellikle tercih edilen modellerden biridir. Bu kubbe türü, çift katmanlı kubbe yapılarına göre birçok avantaja sahiptir ve pek çok projede tercih edilen bir tasarım seçeneğidir. Tek katmanlı kubbe sistemlerinin tercih edilme nedenleri arasında üretim süreçlerinin daha basit olması ve çift katmanlı kubbelere göre belirli tasarım sınırlarında daha düşük maliyetli olması bulunmaktadır. Üretim aşamasında çift katmanlı kubbe sahipleri karmaşıklık ve detaylı işçilik ihtiyacı, tek katmanlı kubbe sahiplerine göre daha azdır. Bu durum, inşaat projelerinin hem süre hem de maliyet açısından daha verimli bir şekilde yönetilmesine olanak tanır.

Tek katmanlı çelik kubbe analizi, bir dizi kritik faktörün incelenmesini gerektirir. Bu faktörler arasında kubbenin boyutu, geometrisi, kullanılan malzemenin özellikleri ve üzerine gelecek yük koşulları gibi unsurlar yer alır. Kubbenin yapısının davranışı, bu parametrelerin kombinasyonuna bağlı olarak farklılık gösterir. Analitik değerlendirmenin ilk adımı, kubbenin geometrisinin ve kullanılacak malzemenin özelliklerinin belirlenmesidir. Bu parametreler, tasarım sürecinin temel taşlarını oluşturur. Ardından, kubbenin statik denge koşulları göz önünde bulundurulur ve bu koşullar altında kubbenin gerilme, deformasyon, moment ve burulma gibi mekanik performans kriterleri hesaplanır. Kubbenin statik analizi, yapının üzerine gelebilecek farklı yük türlerini ve bu yükler altında kubbenin taşıma kapasitesini değerlendirir. Dışsal faktörler arasında rüzgâr, kar yükleri ve deprem gibi etkenler yer alırken, içsel faktörler kubbenin öz ağırlığı ve hareketli yüklerdir. Yük analizi, tasarımın taşıma kapasitesini ve güvenliğini sağlamak adına kritik öneme sahiptir. Kubbenin gerilme analizi, kubbenin yük altında nasıl davrandığını ve farklı bölgelerinde oluşan gerilmeleri değerlendirir. Bu analiz, yapısal bütünlüğün sağlanması için hayati önem taşır. Kubbenin deformasyon analizi ise, kubbenin yük altında nasıl şekil değiştirdiğini belirler. Deformasyon analizi, tasarımın estetik ve fonksiyonel yönlerini ele alır. Kubbenin moment ve burulma analizi, çubuk elemanların moment ve burulma kabiliyetlerini inceler. Bu analizler, kubbenin taşıyıcı elemanlarının dayanıklılığını ve güvenliğini belirlemeye yönelik önemli veriler sunar. Kubbenin moment ve burulma kapasitesi, çubuk elemanların geometrisi, malzeme özellikleri ve yük taşıma karakteristiği gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Tek katmanlı model kubbe sistemi, 600 eleman ve 216 moment aktaran düğüm noktasından oluşan bir yapıdır. Bu yapı, tek katmanlı bir kubbe tasarımını temsil eder ve 28 metre açıklık ile 7,5 metre yüksekliğe sahiptir. Kubbenin tasarımında 2 metre çapında bir basınç halkası ve 24 metre çapında bir çekme halkası yer almaktadır. Toplamda 24 adet özdeş meridyen kafes sistemi ve 7 adet paralel halka kullanılarak kubbe inşa edilmiştir. Kubbenin perspektif ve plan görünümü şekillerle görselleştirilmiştir. Bu model, Dicle Üniversitesi arazisinde Enlem: 37,91732 Boylam: 40,27585 konumuna konumlandırılacak ve Diyarbakır ilinde gerçekleştirilecek bir inşaat projesi olarak planlanmıştır. Bu seçim, kubbenin çevresel ve coğrafi faktörlere uygunluk göstermesini sağlamak amacıyla belirlenmiştir.

Model'in elemanları için belirlenen malzeme sınıfı, akma gerilmesi 355 MPa olan S355 çeliğidir ve bu çelik malzemesinin mekanik özellikler, EN 1993-1-1 standardı 3.2.6 maddesinde tanımlanan değerlere uygun olarak seçilmiştir.

Model'in kaplama malzemesi olarak, Model-1 ile aynı etkin kaplama sisteminden olan lamine cam kaplama tercih edilmiştir. Bu kaplama malzemesi, özellikle estetik ve fonksiyonel gereksinimleri bir araya getirme konusundaki etkili çözümler sunmaktadır. Model'deki kubbenin kaplaması için lamine cam malzemesi tercih edilmiştir. Bu seçim, kubbenin özellikle geniş alanlarını örtmek için uygun bir çözüm sunmaktadır. Lamine cam,



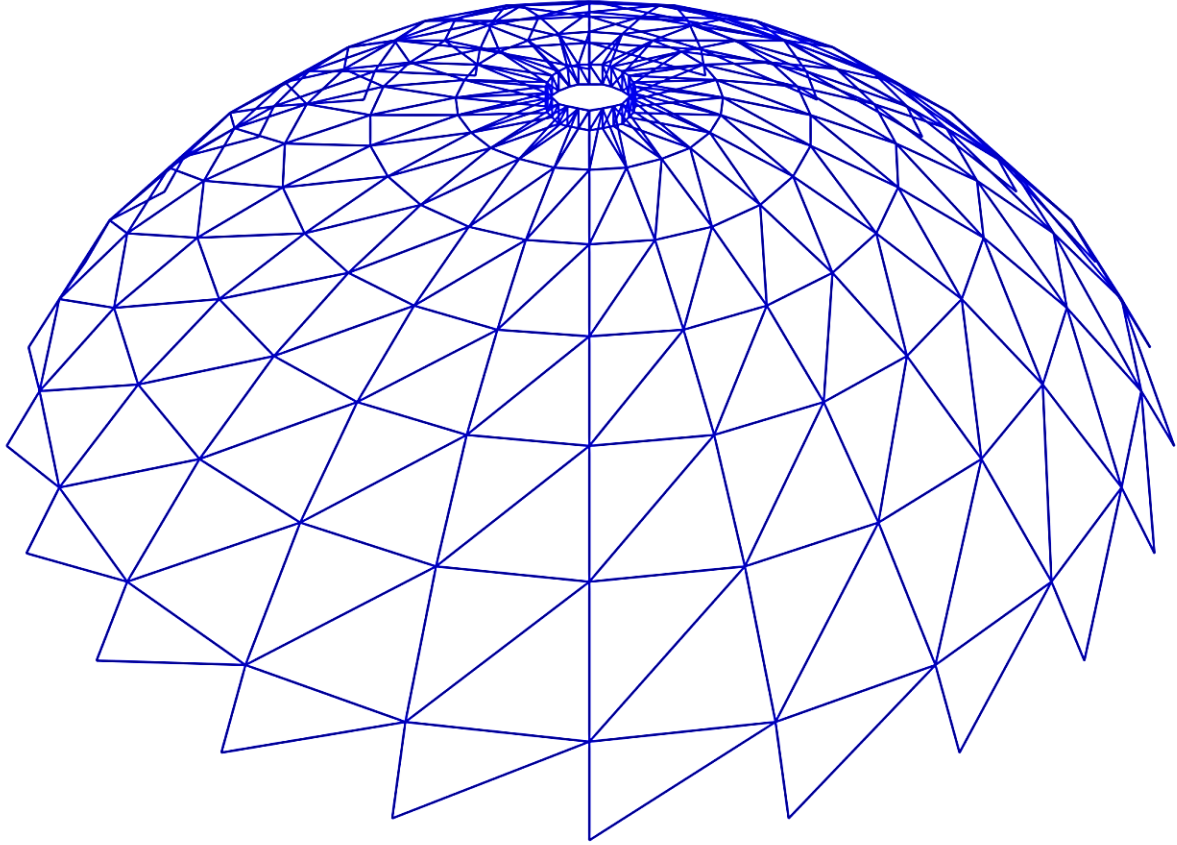
kubbenin i mekânını doğal güneŐ iŐıđından faydalanarak aydınlatmayı sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu sayede yapının iç mekânı hem doğal ıŐıktan yararlanırken hem de estetik bir görünüm elde edilmiştir.

Aynı zamanda, kubbenin yüzeyi yansıtıcı özellikli malzemelerle kaplanarak güneŐ iŐınlarının neden olduğu yüksek ısınmanın önüne geçilmiŐtir. Bu, kubbenin i mekânının aşırı ısınmasını engelleyerek konforlu bir kullanım sağlamayı amaçlar. Kubbenin üzerinde yansıtıcı malzemelerin kullanılması, aşırı ısınma ve enerji tüketimi gibi sorunların minimize edilmesine yardımcı olur.

Sonuç olarak, lamine cam kaplama, Model kubbesinin aydınlatılmasını doğal güneŐ iŐıđı ile sağlamak amacıyla tercih edilmiş ve yansıtıcı kaplama malzemeleri ile güneŐ iŐınlarının neden olduğu aşırı ısınmanın önüne geçilmiŐtir. Bu, hem yapı içinde konforlu bir ortam sağlamak hem de enerji verimliliğini artırmak açısından önemli bir tasarım kararıdır.

Kubbe tasarımında kullanılan kesit özellikleri, kubbenin gerilme dağılımına uygun Şekilde ŐeilmiŐtir. Meridyen kirişleri için IPE profil kullanılmıştır ve bu profil türü BS EN 10365 standardında verilen değerlere uygun olarak tercih edilmiştir. Çember ve diyagonal elemanlar ise kutu profil olarak gruplandırılmıŐ ve BS EN 10210-2 standardında sunulan kutu profil değerleri kullanılarak ŐeilmiŐtir.

Bu Şekilde, Model'nin her bir bileşeni, malzeme Őeimi ve kesit özellikleriyle detaylı bir Şekilde belirlenmiş ve tasarlanmıştır. Bu özenli yaklaşım, yapısal btnlğu sağlama, dayanıklılığı artırma ve tasarımın estetik ve işlevsel gereksinimleriyle uyumunu sağlama amacını taşımaktadır.



Şekil 4. Model perspektif görünüŐü [17]

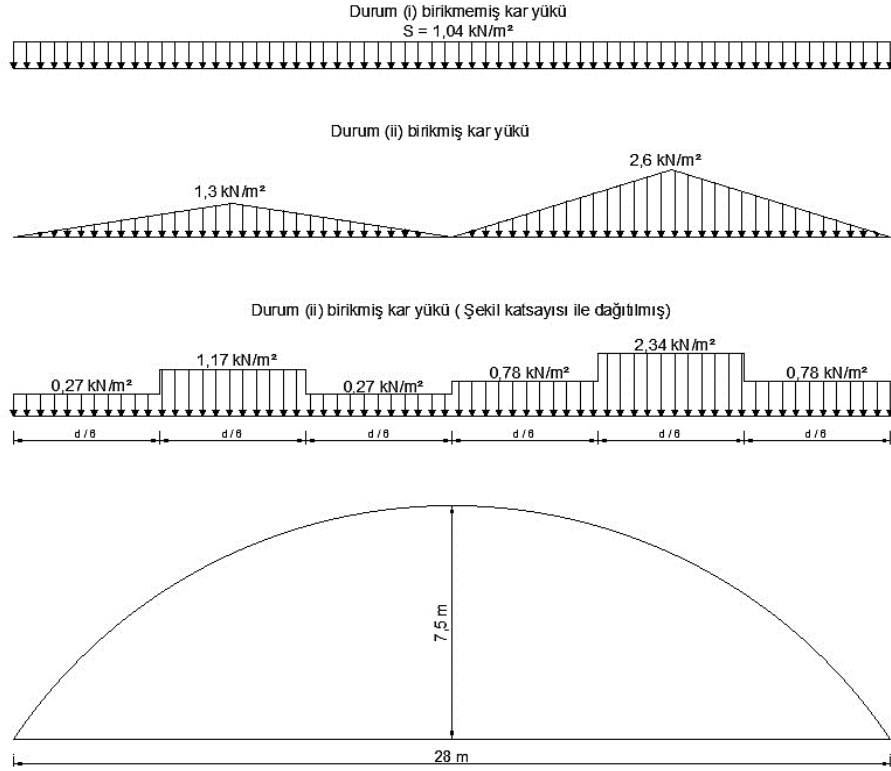
## 2.7. Model Hesap Metodunda Kullanılan Yükler

Model alıŐması kapsamında, çeşitli yük tiplerinin ayrıntılı hesaplamaları yapılarak SAP2000 programına entegre edilmiştir. Bu yük tipleri aşağıda detaylı bir Şekilde açıklanmıŐtır:

1. Sabit ve Hareketli Yükler: Yapının taşıyıcı sistemini etkileyen temel yükler, sabit yükler ve hareketli yükler olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Sabit yükler, yapı elemanlarına sürekli bir etki uygulayan yüklerdir. Örneğin, taşıyıcı sistemin profilleri, kaplama elemanları ve tesisat yükleri bu kategoride yer alır. Bu yükler genellikle yerçekimi ivmesi yönünde etki gösterir ve taşıyıcı elemanların dayanıklılığını

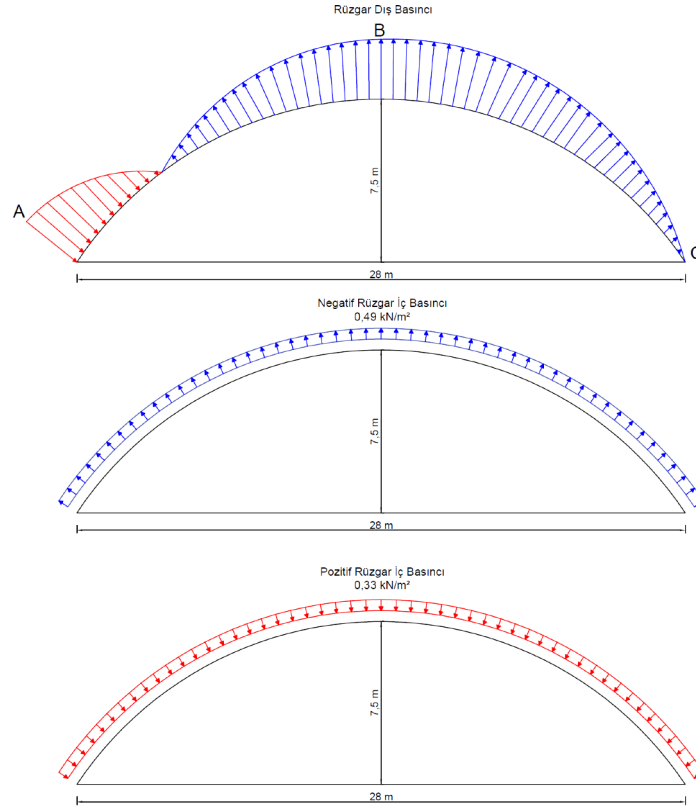
sağlamak amacıyla dikkate alınır. Özellikle cam kaplama elemanları için yük hesaplamaları özenle yapılır. Camın kalınlığına bağlı olarak, cam yüzeyine binen kütleli yük hesaplanır. Lamine camın özellikleri, birim hacim ağırlığı ve kalınlığına göre belirlenen cam yükü hesaplamada temel alınır. Ayrıca, yapıya ek olarak etki eden hizmet yükleri, kullanım amacına bağlı olarak hesaplara dahil edilir. Örneğin, mekanik tesisat yükleri veya geçici yükler bu kategoride yer alabilir. Model için hesaplanan sabit yük  $0,35 \text{ kN/m}^2$  olarak hesaplanmıştır ayrıca olası bir ek servis yükü için de  $0,15 \text{ kN/m}^2$  sağlanarak toplam sabit yük  $0,5 \text{ kN/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Kubbe şeklindeki çatılarda; kirli yüzeyin temizlenmesi, tesisat arızalarının onarımı veya rutin bakım gibi faaliyetler sırasında oluşabilecek dinamik yükler söz konusu olabilir. TS 498 standartına göre, böyle çatılar için hareketli yük değeri  $1.5 \text{ kN/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Ancak tasarım aşamasında, rüzgâr ve kar gibi etkenlerle aynı anda etki etme olasılığı oldukça düşük görüldüğünden, bu dinamik yüklerle birlikte rüzgâr ve kar yükleri ele alınmamıştır. Tasarım, bu yükleri ayrı ayrı ele alarak gerçekleştirilir ve bu yaklaşım, tasarımın pratik ve güvenli olmasını sağlamak amacıyla benimsenir.

2. Kar Yükü: Yapının dayanıklılığını belirlemek adına önemli bir yük türü olan kar yükü, TS EN 1991-1-3 standardına uygun olarak hesaplanır. Bu hesaplamalarda coğrafi konum ve rakım gibi faktörler göz önünde bulundurulur. Kar birikimi, yapı üzerinde asimetric ve simetric dağılımlar şeklinde olabilir. Bu farklı dağılım türleri, kar yükü hesaplamalarında büyük bir öneme sahiptir. Kar yükü hesaplamaları sırasında ilk olarak kar yükü şekil katsayıları belirlenir. Bu katsayılar, kar birikiminin dağılımına ve kubbe şekline bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Şekil katsayıları, kar yükünün yapının üzerindeki dağılımını ve etkisini açıklamak için kullanılır. Kar yükü; birikmemiş tam kar yükü ve birikmiş yarım kar yükü olmak üzere iki farklı yük kombinasyonuna etki eder. Bu yük kombinasyonları, kar birikiminin durumuna bağlı olarak farklı şekillerde yapının davranışını etkiler. Diyarbakır ili istatistik tablosu kullanılarak kar yükü hesaplaması yapılmıştır. Bu tabloya göre, en yüksek kar kalınlığına sahip olan durum baz alınarak zemin kar yükü değeri  $1,3 \text{ kN/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Daha sonra, kar yükü şekil katsayısı modeline göre hesaplanarak, bu değer zemin kar yüküyle çarpılarak elde edilir. Bu sayede, çatı üzerindeki kar yükü hesaplanmış olur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, birikmemiş kar yükü değeri  $1,04 \text{ kN/m}^2$  olarak bulunurken, birikmiş kar yükü hesabı Şekil 5'te gösterildiği şekilde hesaplanır. Daha sonra hesaplama kolaylığı için şekil katsayıları kullanılarak tekrar hesaplanmıştır. Bu yöntemle çatı üzerindeki kar yükü değerleri hesaplanmış olur. Kar yükü dağılımının gösterildiği bu çizimde, kar yükünün yapının üzerinde nasıl dağıldığı ve hangi bölgelerde yoğunlaştığı detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu bilgiler, yapı analizlerinde kar yükünün etkisini daha iyi anlamak ve yapının dayanıklılığını doğru bir şekilde değerlendirmek için önemlidir.
3. Rüzgâr Yükü: Rüzgâr yükü, yapısal tasarım hesaplamalarında büyük bir öneme sahip olan karakteristik bir yük türüdür. Rüzgârın yapılar etkisinin hesaplanmasında, TS EN 1991-1-4 standart belgesinde yer alan parametreler ve faktörler kullanılır. Bu standart kılavuz, rüzgârın yapılar olan etkilerini belirleme ve yapıların rüzgâra karşı dayanıklılığını analiz etme süreçlerini yönlendirir. Bu yük türü, ortalama rüzgâr hızı ve diğer değişkenler temel alınarak hesaplanır. Hesaplamalar sırasında, engebelik katsayısı, orografi katsayısı ve diğer önemli parametreler titizlikle göz önünde bulundurulur. Rüzgâr yükü, dış ve iç basınç kuvvetleri olarak iki ana bileşene ayrılır. Dış basınç kuvveti, rüzgârın yapının dış yüzeyine çarpması sonucu oluşan basınç ve emme kuvvetlerini içerir. İç basınç kuvveti ise, rüzgârın kapalı olmayan yapıların içine girmesiyle meydana gelen basınç etkisini ifade eder. Rüzgâr yükü hesaplamaları, yapıya etki eden rüzgâr basınçlarını belirlemek amacıyla yapılan kritik hesaplamalardır. Bu hesaplamalarda kubbenin geometrik yapısına göre belirlenen basınç katsayıları büyük bir rol oynar. Bu katsayılar, yapının farklı noktalarında meydana gelen basınç farklarını ifade eder ve bu farklar, kubbenin şeklinden kaynaklanır. Elde edilen basınç katsayıları ile birlikte bölgesel rüzgâr dış basıncı hesaplamaları gerçekleştirilir. Kubbenin geometrisine bağlı olarak belirlenen basınç katsayıları, yapı üzerindeki rüzgâr etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde açıklar.



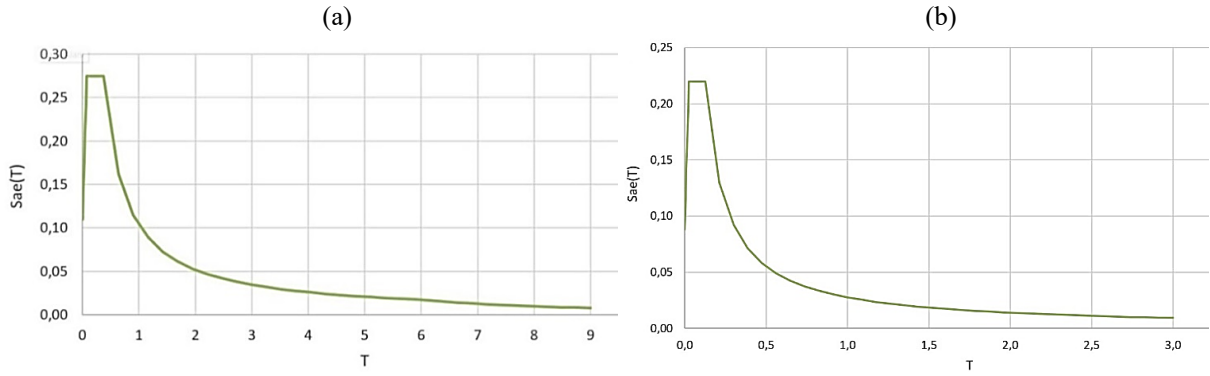
Şekil 5. Model için Durum (i) birikmemiş kar yükü ve durum (ii) birikmiş kar yükü dağılımı [17]

Özellikle n, tepe ve arka noktalarda oluşan basınç farklarını ifade eder ve bu da yapının dayanıklılığını anlamak için kritik öneme sahiptir. Hesaplanan basınç katsayılarıyla birlikte, bölgesel rüzgâr dış basınçları tespit edilir. Rüzgâr yükü hesaplamaları bazen karmaşık yapılarda daha da karmaşık hale gelebilir. Özellikle ift eğrilikli küresel sistemler gibi yapılarda, hesaplama süreci daha fazla dikkat ve zen gerektirebilir. Bu tür durumlarda, rüzgâr dağılımını belirlemek için önceden formüller kullanmak veya rüzgâr tüneli testleri gerçekleştirmek önemlidir. Literatürde, kubbe Şeklindeki yapılar için rüzgâr yüklerini hesaplamak amacıyla çeşitli yöntemler ve öneriler bulunmaktadır. Rüzgâr tüneli testleri gerçek dünya koşullarını taklit edebilse de prototip yapının rüzgâr tünelinde oluşan rüzgâr profili ve türbülans değerleri ile uyumu karmaşık olabilir. Bunun yanı sıra, akıŐkanın viskozitesinden kaynaklanan sınır tabakası etkileŐimi, kubbenin yüzeyindeki basınç ve emme katsayılarını da etkileyebilir. Rüzgâr yükleri, yapıya dıŐarıdan etki eder ve tamamen kapalı yapılar için dış basınç kuvveti oluŐtururken, açık veya kısmen kapalı yapılar için i basınç kuvvetini de içerir. Diyarbakır ilindeki rüzgâr hızı istatistik raporu, ortalama rüzgâr hızını ve mevsim ile yn faktörlerini kullanarak esas rüzgâr hızını 35 m/sn olarak belirlemektedir. Bu esas rüzgâr hızı, sonrasında rüzgâr basınının hesaplanmasında kullanılır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen tepe hız kaynaklı rüzgâr basını, yapı geometrisine göre deđiŐen basınç katsayılarıyla çarpılarak kubbenin bölgesel rüzgâr basını hesaplanır. Bu adımlar sayesinde, kubbenin rüzgâr etkisine maruz kalan bölgelerindeki basınç değerleri, yapı Şekline ve konumuna bağlı olarak dikkate alınarak belirlenmiş olur. Rüzgâr yükünün kubbe modeline olan etkisi, yük dağılımını gösteren Şekil 6'da ayrıntılı bir Şekilde açıklanmıŐtır. Bu dağılım, yapının rüzgâr yükü altındaki davranışını daha iyi anlamak için önemlidir.



Şekil 6. Model için kubbe üzerindeki rüzgâr dağılımları [17]

4. Deprem Yüğü: Uzay kafes sistemleri, yapısal hafifliği sayesinde diğer yapı sistemlerine kıyasla deprem yükü altında daha az etkilenme eğilimindedir. Bu nedenle, Dicle Üniversitesi arazisi için uzay kafes sistemi tercih edilmiştir. Deprem yükünün hesaplanmasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018) gereklilikleri titizlikle göz önünde bulundurulmuştur. Yerel zemin sınıfı "ZB" olarak belirlenmiştir. Spektral ivme katsayıları, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nın (AFAD) interaktif web haritası üzerinden elde edilmiştir. Bu tasarım spektral ivme katsayıları, deprem yükünün etkisini doğru bir şekilde temsil etmek amacıyla hesaplamalara dahil edilmiştir. Yatay elastik tasarım spektrumu ve düşey elastik tasarım spektrumu grafikleri kullanılarak, yerçekimi ivmelerinin deprem yükü hesaplamalarında nasıl etki edeceği detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bina kullanım sınıfı, deprem tasarım sınıfı ve yapı yüksekliği sınıfı gibi önemli parametrelerin tespiti titizlikle gerçekleştirilmiştir. Proje sahası için, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nda (AFAD) bulunan interaktif web haritası kullanılarak spektral ivme katsayıları tespit edilmiştir. Bu değerler boyutsuz olarak ifade edilmiş olup,  $S_s$  değeri 0,305 ve  $S_1$  değeri 0,129 olarak belirlenmiştir. Yerel zemin sınıfı ve spektral ivme katsayılarına bağlı olarak yerel zemin katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra tasarım ivme katsayıları hesaplanmıştır:  $S_{DS}$  değeri 0,275 ve  $S_{D1}$  değeri 0,103 olarak bulunmuştur. Bu hesaplanan değerler, yapının titreşim periyotları kullanılarak Şekil 7'de gösterilen yatay elastik tasarım spektrumu ile düşey eksen tasarım spektrum ivmelerinin oluşturulmasını sağlamıştır.



Şekil 7. (a) Yatay elastik tasarım spektrumu, (b) Düşey elastik tasarım spektrumu [17]

5. Sıcaklık Yüğü: Uzak kafes sistemlerinde çelik elemanların sıcaklık değışimlerine bağlı olarak meydana gelen genleşme ve büzülme, gerilmelere neden olabilir. Bu gerilmeler, çubuk ve düğüm noktalarında farklılık gösterir ve ek yüklerin ortaya çıkmasına yol açar. Sıcaklık değışikliği  $\pm 20^\circ\text{C}$  olarak kabul edilmiştir; bu, tipik bir sıcaklık dalgalanması değeridir ve çelik elemanların genleşmesi ve büzülmesi için kullanılan bir referanstır. Sıcaklık etkisi, yapıya özğü bir yük olarak kabul edilir ve yük kombinasyonları içinde yer almaz. Bu durumun sebebi, sıcaklık yükünün sistem üzerinde kritik bir etkiye sahip olmamasıdır. Sıcaklık yükleri, elemanların gerilme davranışını modellenirken kullanılır. Örneğin, çelik elemanların uzunlamasına gerilmesi ve büzülmesi nedeniyle meydana gelen gerilmeler bu hesaplamalarda ele alınır. Sıcaklık yüklerinin karakteristik olarak analiz edilmesi, sistemin sıcaklık değışikliklerine nasıl tepki vereceğini anlamak için önemlidir. Bu şekilde, elemanların sıcaklık değışikliklerine karşı nasıl davrandığı ve bunun yapının genel davranışına etkisi daha iyi anlaşılabilir. Sonuç olarak, sıcaklık yükleri uzak kafes sistemlerinde çelik elemanların sıcaklık değışimlerine bağlı olarak oluşan gerilmeleri ifade eder. Bu gerilmeler, ek bir yük olarak ele alınır ve yapının genel davranışını nasıl etkilediği titizlikle incelenir. Ancak, bu model bağlamında, diğer yük türleri ile kıyaslandığında sıcaklık yükünün önemi daha düşük düzeydedir dolayısıyla yük kombinasyonlarında dikkate alınmamıştır.

Hesaplanan yükler sonucunda, ÇYTHYE-2018'e göre YDKT'ye göre oluşturulmuştur. Bu kombinasyonlar, her yükün farklı yönlerden alındığı aynı kombinasyon içinde sunulmuştur. Ana yük kombinasyonları aşığıdaki gibidir. Ana yük kombinasyonlarından elde farklı yük yönlerine göre kombine edilen toplam 40 sistem kombinasyonu oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, en kritik yükün belirlenmesine olanak tanımaktadır.

- 1.4G
- 1.2G+1.6S+0.8W
- 1.2G+Q+0.5S+1.6W
- 1.2G+Q+0.2S+ E
- 0.9G+1.6W
- 0.9G+E

Burada;

“G” sabit yük, “Q” hareketli yük, “S” kar yükü, “W” rüzgâr yükü, “E” deprem etkisidir

### 3. Analiz Sonuçları

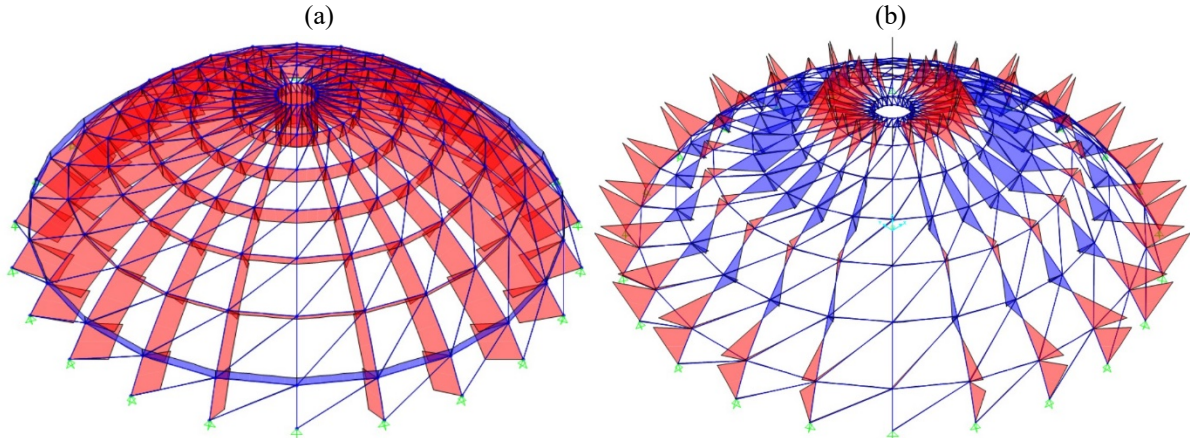
#### 3.1. Kubbe elemanları eksenel gerilme değerleri

Model, SAP2000 programı kullanılarak ayrıntılı bir analize ve tasarıma tabi tutulmuştur. Yapının elemanlarının tasarımında AISC 360-10 yönetmeliğine uygun olarak LRFD (Load and Resistance Factor Design) yük bileşimleri kullanılmıştır. Bu çerçevede, moment ve eksenel yük diyagramları Model'in tek katmanlı ve çubuk birleşim elemanlarından oluştuğunu ve moment aktaran birleşim elemanları olduğunu göz önünde bulundurarak elde edilmiştir. Bu elemanların birleşim bölgelerinde moment değerleri ve eksenel yük gerilmelerinin yanı sıra burulma gerilmeleri de dikkate alınmıştır. Model'in birleşim elemanlarının yapısından kaynaklanan moment etkisi ve eksenel yük gerilmeleri, analizin odak noktalarını oluşturur. Ayrıca, radyal ve çember kirişler arasında farklı

gerilme değerleri ve davranışlarının olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle, analiz sonuçları bu farklılıkları titizlikle ele almıştır.

Çubukların kendi öz ağırlığı, kaplama yükleri ve ek servis yükleri sonucunda oluşan ağırlık, yapı üzerinde eksenel yüklerin dağılımını şekillendirmektedir. Şekil 8(a)'da gösterildiği gibi, bu eksenel yüklerin dağılımı örneklenmiştir. Model, tek katmanlı bir yapıya sahip olup, tüm yay kirişler bu eksenel yükler altında bulunmaktadır. Paralel çemberlerde ise, etek kısmındaki çemberde çekme gerilmesi oluşurken diğer çemberlerde basınç gerilmesi meydana gelmektedir. Yay kirişlerinde, en büyük basınç kuvveti etek bölümünde oluşmaktadır ve bu kuvvetin değeri 26,59 kN olarak belirlenmiştir. Paralel çemberlerde ise, en yüksek basınç gerilmesi tepe çemberinde görülmekte ve bu gerilme değeri 25,55 kN olarak hesaplanmıştır. Diğer bir yandan, çekme gerilmesi olan etek çemberinin eksenel gerilmesi ise 4,54 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, yapının farklı bölgelerindeki çubuklara etki eden eksenel gerilmeleri ve bu gerilmelerin yoğunluklarını göstermektedir. Paralel çemberlerdeki farklı gerilme yönelimleri, yapısal elemanların farklı konumlarına bağlı olarak nasıl değişebileceğine işaret etmektedir. Bu bilgiler, yapısal analiz ve tasarım süreçlerinde elemanların taşıma kapasitesini ve güvenliğini belirlemede önemli bir role sahiptir.

Kubbe üzerinde kar yükünün homojen bir şekilde dağıtılarak her alana etki etmesi, moment dağılımını belirgin bir şekilde etkilemektedir. Şekil 8(b)'de sunulduğu gibi, bu dağılım sonucunda moment diyagramı oluşmuştur. Bu moment diyagramı incelendiğinde, sistem üzerinde oluşan maksimum moment değerleri de görülebilmektedir. Pozitif yönde en büyük moment değeri 0,46 kN.m olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde, negatif yönde de maksimum moment değeri -0,8 kN.m olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kar yükünün homojen bir şekilde kubbe üzerine dağıtılması sonucunda oluşan moment dağılımını göstermektedir. Pozitif ve negatif moment değerleri, kubbenin farklı bölgelerinde nasıl etkilendiğini ve moment dağılımının nasıl şekillendiğini açıkça yansıtmaktadır. Bu bilgiler, yapısal analiz süreçlerinde kubbenin taşıma kapasitesini ve yapısal bütünlüğünü değerlendirmede önemli bir rol oynamaktadır.



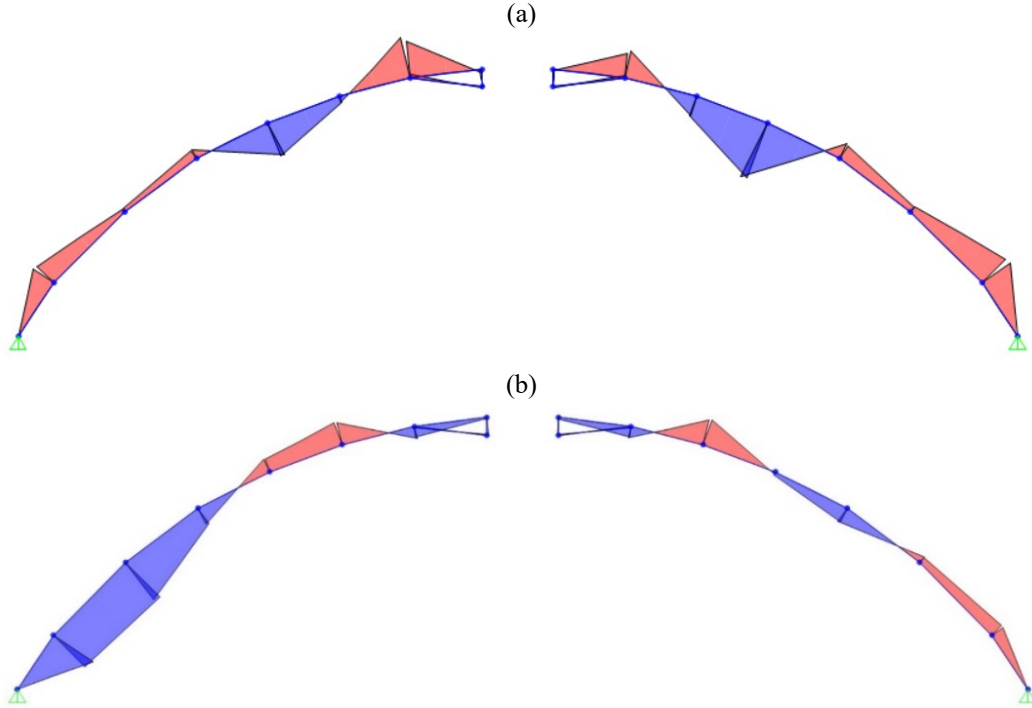
**Şekil 8.** Karakteristik yükler altında gerilme diyagramları; (a) Sabit yük altında kubbe sisteminde oluşan eksenel yük diyagramı, (b) Tam kar yükü altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı [17]

Yarım kar yükü, kubbenin yüzeyinde eşit bir dağılıma sahip olmayan bir yük şeklidir. Bu durum, hem yereldeki hem de geneldeki burkulmaya neden olabileceği için sonuçları oldukça kritiktir. Şekil 9(a)'da gösterildiği gibi, kiriş üzerinde yarım kar yükü etkisiyle oluşan moment dağılımı incelendiğinde, pozitif yönde maksimum moment değeri 1,66 kN.m ve negatif yönde maksimum moment değeri ise 1,13 kN.m olarak tespit edilmiştir. Kubbe tasarımında kullanılan diyagonal elemanlar, kubbenin stabilitesini sağlamak için önemli bir rol oynamaktadır. Bu elemanlar, çelik yapıdaki düzlemsel yüzeylere yüklerin daha homojen bir şekilde dağılmasını temin ederler. Bu sayede, yapının herhangi bir yönde eğilmeden daha sağlam bir şekilde durabilmesi mümkün olur. Özellikle eşit dağılmamış yüklenme durumunda, bu diyagonal elemanlar bölgesel olarak hem çekme hem de basınç gerilmesine maruz kalabilirler. Ayrıca kubbe modeli yarım kar yüküne maruz kaldığında, diyagonal elemanlar bölgesel olarak eksenel çekme ve basınç gerilmelerine maruz kalarak yapıya dayanıklılığını artırır ve ek bir stabilite sağlar. Bu durum, yapıya yarım kar yükü gibi dengesiz yüklemelerin etkilerine karşı daha güçlü bir direnç kazandırdığı için oldukça önemlidir.



DıŐ rüzgâr yűkű, kubbenin dıŐ yűzeyinde oluŐturduđu basınç ve vakum etkilerine bađlı olarak gerilmelere maruz kalır. Őekil 9(b)'de X yűnűnden gelen dıŐ rüzgâr yűkűnűn kubbe kiriŐinde oluŐturduđu moment diyagramı gűrűlmektedir. Bu yűkűn etkisiyle kubbe kiriŐinde meydana gelen moment dađılımı analiz edilmiŐtir. Sonuçlar, bu yűkűn kubbe kiriŐi űzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Bu yűk sonucunda, kubbe kiriŐinde pozitif yűnde en bűyűk moment deđereri 0,68 kN.m olarak belirlenmiŐtir. Aynı Őekilde, negatif yűnde en bűyűk moment deđereri ise 0,36 kN.m olarak hesaplanmıŐtır. Sađ kar yűklemesi gibi, bu dıŐ rüzgâr yűklemesi de kubbe yűzeyindeki yűk dađılımını asimetrik bir Őekilde oluŐturduđu için, kubbe burkulmasında kritik deđerlerin oluŐmasına neden olabilir.

Bu bilgiler, dıŐ rüzgâr yűkűnűn kubbe űzerindeki etkilerini ve yapıya nasıl bir etki yaptığını gűstermektedir. Asimetrik yűk dađılımının, kubbe burkulmasında nasıl kritik deđerler oluŐturabileceğini anlamak, yapısal analiz ve tasarım sűreçlerinde űnemli bir adımdır. Bu tűr etkilerin deđerlendirilmesi, yapısal bűtűnlűđűn korunması ve gűvenliđin sađlanması açısından bűyűk bir rol oynamaktadır.



**Őekil 9.** Karakteristik yűkler altında gerilme diyagramları; (a) Yarım kar (sađ) yűkű altında kubbe sisteminde oluŐan moment diyagramı, (b) DıŐ rüzgâr yűkű altında kubbe sisteminde oluŐan moment diyagramı [17]

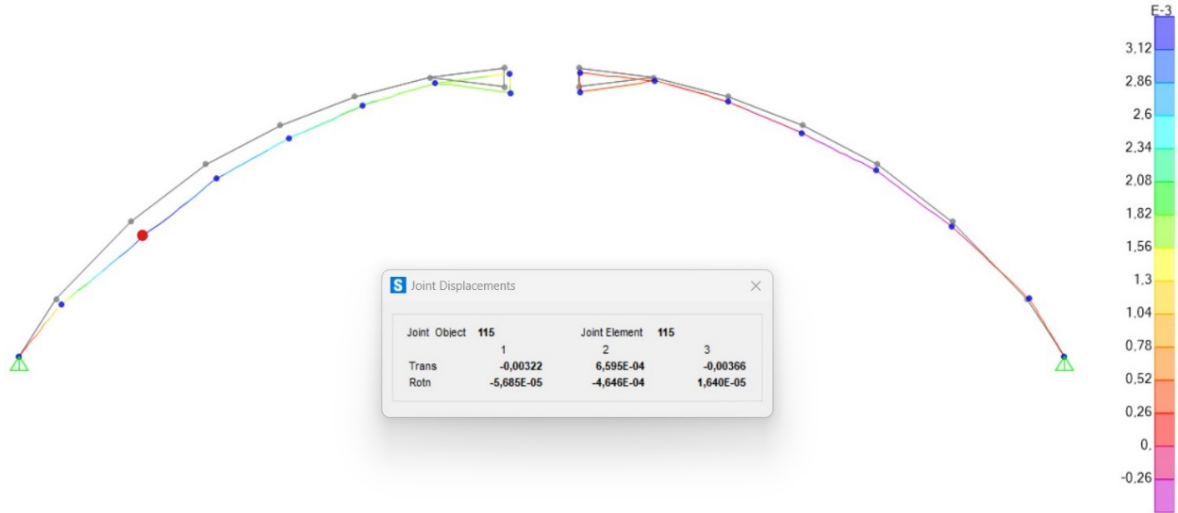
### 3.2. Kubbe Deplasman Sınır Kontrolű

DűŐey yer deđiŐtirme durumu, yapısal bűtűnlűđűn ve dayanıklılıđının deđerlendirilmesi açısından űnemlidir. DűŐey ekseninde meydana gelen yer deđiŐtirmeler, çeŐitli kombinasyonlar kullanılarak kontrol edilmiŐ ve maksimum yer deđiŐtirme sınırı belirlenmiŐtir. ÇYTHYE-2018 madde 15.2'ye gűre, dűŐey yer deđiŐtirmenin açıklıđa oranı 1/300 sınırını aŐmamalıdır. Model űzerinde gerçekteŐirilen analizler sonucunda elde edilen en bűyűk dűŐey yer deđiŐtirmesi  $G+0,5Q+W_1$  kombinasyonunda 3,72 mm olarak hesaplanmıŐtır. Bu deđer, belirtilen sınır uzunluđu olan 93 mm'yi aŐmadığını gűstermektedir. Bu sonuçlar, yapı űzerinde meydana gelen dűŐey yer deđiŐtirmelerin kabul edilebilir sınırlar içinde olduđunu ortaya koymaktadır.



Şekil 10. Düşey yer değiştirme kontrolünün  $G+0,5Q+W_1$  yük kombinasyonu altında deplasmanı [17]

Düşey yer değiştirme sınır durumunun daha açık bir şekilde anlaşılması için şekil 7'de gösterilen deplasman durumu incelenebilir. Bu şekil, yapısal analiz sonuçlarına görsel bir bakış sunarak düşey yer değiştirme sınırlarını daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır. Bu bilgiler, yapısal güvenliği ve dayanıklılığı değerlendirmede önemli bir rol oynar ve yapı üzerindeki düşey yer değiştirmelerin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu teyit etmektedir.

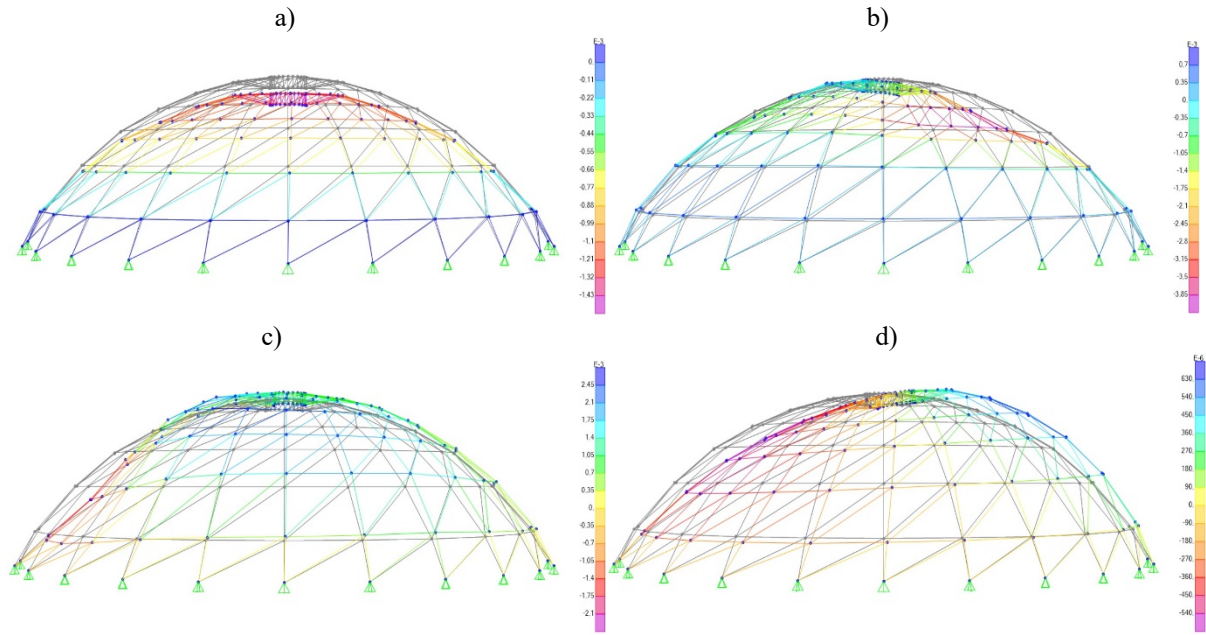


Şekil 11. Yatay yer değiştirme kontrolünün  $G+0,5Q+W_1$  yük kombinasyonu altında deplasmanı [17]

Yapı üzerindeki yatay yer değiştirme durumu, yapısal bütünlüğün ve dayanıklılığın değerlendirilmesinde kritik bir faktördür. Bu nedenle, yer değiştirmenin kontrolü çeşitli kombinasyonlar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve maksimum yer değiştirme sınırı belirlenmiştir. ÇYTHYE-2018 madde 15.3'e göre, yapının cephe kaplaması ve türüne bağlı olarak yatay yer değiştirmenin belirli bir sınıra sahip olması gerekmektedir. Model üzerinde yapılan analizler sonucunda yatay yer değiştirmeleri incelenmiş ve bu yer değiştirmelerin belirlenen sınırlar içinde olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonuçları, yapı üzerinde meydana gelen yatay yer değiştirmelerin, kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermektedir. Yatay yer değiştirme sınır durumunun daha açık bir şekilde anlaşılması için şekil 8'de gösterilen deplasman durumu incelenebilir. Bu şekil, yatay yer değiştirmeleri ve sınırlarını görsel olarak sunarak yapı üzerindeki yatay yer değişiminin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu teyit etmektedir. Yatay yer değişiminin kontrolü, yapısal güvenliği ve dayanıklılığı sağlamada önemli bir adımdır ve analiz sonuçları bu konuda yapıya olan güveni artırmaktadır.



Farklı karakteristik yükler altında düğüm noktalarının düşey yer değiştirmeleri, yapısal analizin önemli bir bileşenini oluşturur. Bu nedenle, çeşitli karakteristik yükler altında meydana gelen düşey yer değişimleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analiz sonuçları, bu değişimleri daha iyi anlamak ve yapısal bütünlüğü değerlendirmek amacıyla renk skalası kullanılarak düşey yer değiştirmeleri Şekil 11 'de görselleştirilmiştir. Her karakteristik yük durumu altında, düğüm noktalarının düşey yönde olan yer değiştirmeleri farklı olabilir. Bu değişimler, yapı üzerindeki yük dağılımına, geometriye ve diğer etmenlere bağlı olarak değişebilir. Düşey yer değiştirmeleri, renk skalası kullanılarak farklı renk tonlarıyla ifade edilmiştir. Bu görselleştirme yöntemi, farklı düşey yer değiştirme seviyelerini kolayca ayırt etmemize ve analiz sonuçlarını daha net anlamamıza yardımcı olur. Bu analiz sonuçları, yapı üzerindeki düşey yer değişimlerinin karakteristik yükler altında nasıl değiştiğini ve hangi bölgelerde daha büyük yer değişimlerinin meydana geldiğini göstermektedir. Bu bilgiler, yapısal tasarımın ve dayanıklılığın değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar ve yapı üzerindeki yer değişimlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermek için kullanılır.



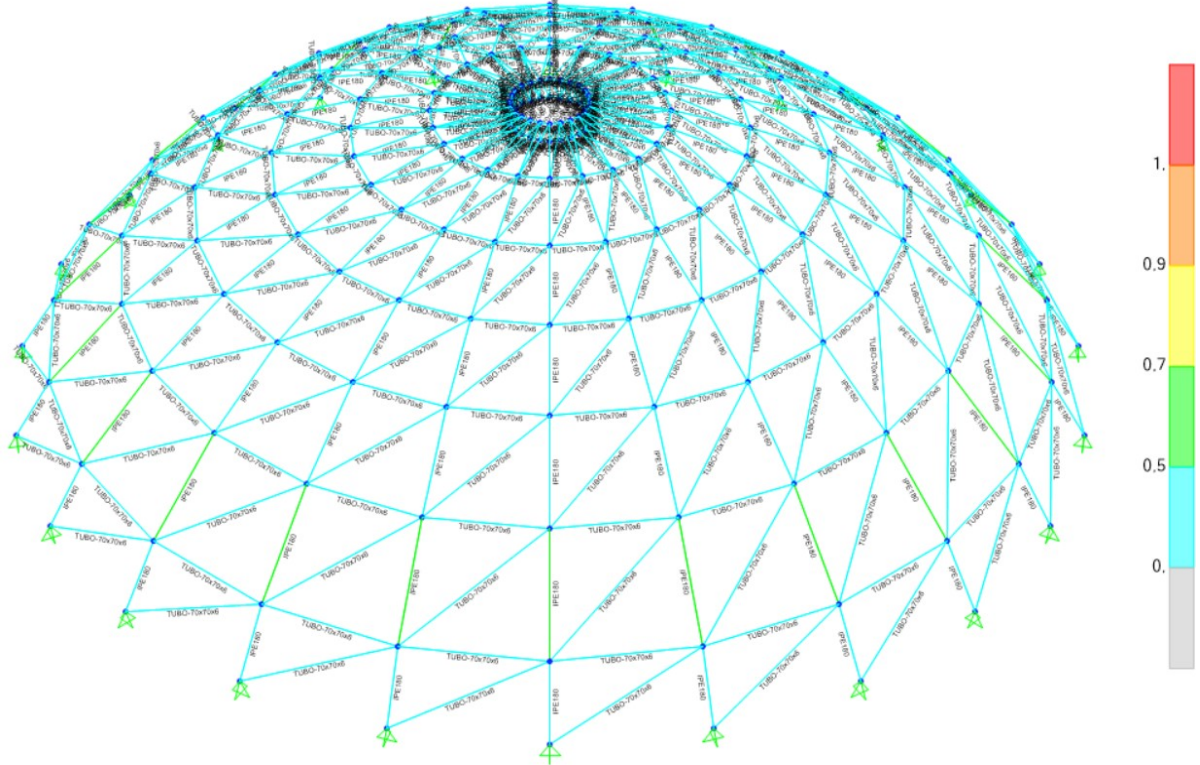
**Şekil 12.** Karakteristik yükler etkisi altında deplasman durumu; (a) Sabit yük, (b) yarım sağ kar yükü, (c) dış yatay rüzgâr yükü, (d) deprem yükü [17]

Sonuç olarak, Model'in hem düşey hem de yatay yer değiştirmeleri, belirlenen tasarım sınırlamalarını aşmayacak şekilde titizlikle kontrol edilmiştir. Bu analiz sonuçları, yapısal hesaplamaların doğruluğunu ve güvenilirliğini yansıtmaktadır. Ayrıca, çelik elemanların boyutlandırılmasında rehberlik sağlayan önemli verileri içermektedir. Yapının bütünlüğü ve dayanıklılığı açısından önemli olan düşey ve yatay yer değiştirmelerinin sınırlar içinde olduğunun tespit edilmesi, yapıya güvenli bir şekilde hizmet edebileceğini teyit eder.

### 3.3. Kubbe Elemanları Tasarım Sonuçları

Tek katmanlı kubbe sistemi tasarımında, çubuk elemanlar üzerinde meydana gelen gerilme değerleri temel alınarak SAP2000 programıyla optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon sayesinde çubuk kesitleri belirlenmiş ve tasarım süreci optimize edilmiştir. Bu süreçte, çubuk elemanların üzerindeki gerilme değerleri ve burkulma davranışı dikkate alınarak kesit seçimi yapılmıştır. Şekil 13'te çubuk elemanların Etki/Kapasite oranlarını renk skalasıyla göstererek sunmaktadır. Yapılan YDKT yöntemine uygun tasarım sonucunda, tüm meridyen kiriş elemanları IPE-180 profilini kullanacak şekilde belirlenmiştir. Aynı şekilde, çember, diyagonal ve alt kiriş elemanları TUBO-70x70x6 kutu kesiti olarak tasarlanmıştır. Tasarım süreci, imalat, nakliye ve montaj aşamalarında kolaylık sağlamak ve hatalı işlemlerin önüne geçmek amacıyla her çubuğun aynı kesitte tasarlanmasını içermektedir.

Bu optimizasyon sonuçları, çubuk elemanlarının uygun kesitlerle boyutlandırılmasıyla yapısal dayanıklılığın ve güvenliğin sağlanması hedeflenmiştir. Ayrıca, tüm çubukların aynı kesitte olması imalat ve montaj süreçlerini basitleştirerek daha etkili bir uygulama sağlamayı amaçlamaktadır. Bu tür optimizasyonlar, yapı mühendisliği tasarımının pratik ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine katkıda bulunur.



Şekil 13. YDKT'ye göre tasarımı yapılmış ve etki/kapasite oranına göre renklendirilmiş model görüntüsü [17]

Kubbenin en kritik çubuğu olarak kabul edilen ve etek bölümünde yer alan meridyen kiriş elemanının tasarım detayları, Şekil 14'te sunulmuştur. Bu elemanın tasarımı, hem eksenel basınç hem de moment etkileri altında gerçekleştirilmiştir. Tasarım süreci, ilgili yönetmeliğin belirlediği kurallara tam uygunluk sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Elemanın eksenel basınç etkisi altında taşıma kapasitesi, ilgili hesaplamalar ve yönetmelik kuralları temel alınarak belirlenmiştir. Aynı şekilde, elemanın moment etkisi altındaki davranışı da yönetmeliğin ilgili bölümlerine göre hesaplanmıştır. Hem eksenel basınç hem de moment etkilerinin birleşik etkisi, elemanın dayanıklılığını ve taşıma kapasitesini belirlemede önemli bir rol oynamıştır. Tasarım süreci, yönetmelikte belirtilen güvenlik faktörleri ve tasarım kriterlerine göre gerçekleştirilmiştir. Elemanın malzeme özellikleri, boyutları ve taşıma kapasitesi, bu yönetmelik kuralları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Tasarımın sonucunda elde edilen eleman boyutları, eksenel basınç ve moment etkilerine karşı yeterli dayanıklılığı sağlayacak şekilde seçilmiştir.

```

AISC 360-10 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C

Frame : 319      X Mid: -12,      Combo: 1.2G 1.6Q_0,5SL Design Type: Brace
Length: 2,828    Y Mid: 0,      Shape: IPE180      Frame Type: SCBF
Loc : 2,828      Z Mid: 2,5      Class: Compact     Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD  Analysis: Direct Analysis
D/C Limit=1,    2nd Order: General 2nd Order      Reduction: Tau-b Fixed
AlphaPr/Py=0,138 AlphaPr/Pe=0,449 Tau_b=1,          EA factor=0,8      EI factor=0,8

PhiB=0,9        PhiC=0,85        PhiTY=0,9        PhiTF=0,75
PhiS=0,9        PhiS-RI=1,       PhiST=0,75

A=0,002         I33=1,317E-05    r33=0,074        S33=1,463E-04    Av3=0,001
J=0,            I22=1,010E-06    r22=0,021        S22=2,220E-05    Av2=9,540E-04
E=210000000,    Fy=355000,       Ry=1,1           z33=1,660E-04    Cw=0,
RLLF=1,         Fu=510000,

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 1.2G_1.6Q_0,5SL)
Location      Pu      Mu33      Mu22      Vu2      Vu3      Tu
2,828         -117,445 -2,883    -0,052    1,714    0,034    5,414E-05

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1a)
D/C Ratio:    0,655 = 0,602 + 0,048 + 0,004
              = (Pr/Pc) + (8/9) (Mr33/Mc33) + (8/9) (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-1a)
Factor        L      K1      K2      B1      B2      Cm
Major Bending 1,      1,      1,      1,      1,      1,
Minor Bending 1,      1,      1,      1,      1,      0,255

LTB           Lltb   Kltb   Cb
1,            1,      2,252

Pu      phi*Pnc   phi*Pnt
Force  Capacity Capacity
Axial  -117,445 195,06   763,605

Mu      phi*Mn   phi*Mn   phi*Mn
Moment No LTB  No LTB   No LTB
Major Moment -2,883 53,037 53,037 34,133
Minor Moment -0,052 11,055

SHEAR CHECK
Status      Vu      phi*Vn   Stress
Major Shear 1,714 203,202 0,008 OK Ratio Check
Minor Shear 0,034 279,115 0, OK

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS
P      P
Comp Tens
Axial -117,445 0,

```

Şekil 14. Kritik kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları [17]

### 3.4. Kubbe modelinin ÇYTHYE-2018'e göre kontrol edilmesi

Yapısal analiz sonuçlarına göre, program çıktısının doğruluğunu ve güvenliğini sağlamak amacıyla, ÇYTHYE-2018'e uygun olarak matematiksel olarak gözden geçirilmiştir. Model sistemi için çeşitli kombinasyonlar altında meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri etkisi altında, en kritik çubuk elemanın dayanıklılığı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, ÇYTHYE-2018 kriterlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İncelenen çubuk, Şekil 14'Te tanımlanan kritik basınç yükü altındaki meridyen giriş elemanıdır. Bu eleman, hem eksenel basınç yükü hem de iki eksen boyunca etki eden moment yükü gibi farklı yüklemelere maruz kalmaktadır.

### 3.5. Basınç kuvveti altındaki çubuğun tasarım kontrolü

#### 3.5.1. Yerel burkulma için enkesit sınıflandırılması

Eleman kesitlerinin aksel basınç gerilmesi altındaki davranışını değerlendirirken, yerel burkulma sınır koşulunun iki ayrı senaryoda incelenmesi gerekmektedir: narin enkesit durumu ile narin olmayan enkesit durumu. Yerel burkulma narinlik değeri,  $\lambda$  olarak adlandırılır ve bu değer, narinlik sınırı olan  $\lambda_r$  değerini aşmadığında kesitin "narin olmayan enkesit" olarak kabul edildiği, ancak aştığında kesitin "narin enkesit" olarak adlandırıldığı bir kriterdir.

Tasarım süreci sonucunda tercih edilen yaklaşım, çift simetrik eksenli IPE 180 profilinin başlık ve gövde bölümleri üzerine odaklanmıştır. Yerel burkulma kontrolü, denklem (1) ve (2)'nin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Başlık parçasının kontrolünde ise (Tablo 5.1A, Durum 1) koşulları dikkate alınmıştır. Bu koşullar, yapısal bütünlüğün sağlanması ve dayanıklılığın korunması amacıyla kesitin yerel burkulma davranışının kritik bir şekilde analiz edilmesini gerektirir.

$$\lambda = \frac{b}{2t_w} = \frac{45,5}{5,3} = 8,58 < \lambda_r = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 13,62 \quad (1)$$

Gövde parçasının yerel burkulma davranışının analizi, (Tablo 5.1A, Durum 5) koşulları temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu koşulların gözetilmesi, kesitin yapısal bütünlüğünün sağlanması ve dayanıklılığının korunmasının amaçlandığı bir süreci ifade eder. Kesitin yerel burkulma davranışının titizlikle analiz edilmesi, potansiyel zayıf noktaların tespit edilmesi ve kesitin tasarımının güvenli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi için büyük önem taşır. Bu sayede olası yüklenme durumlarında kesitin yeterli performansı sağlanabilir ve yapısal sağlamlık korunabilir.

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{146}{5,3} = 27,55 < \lambda_r = 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 36,24 \quad (2)$$

Verilen  $\lambda$  değeri  $\lambda_r$  değerini aşmadığından, yerel burkulma durumu "narin olmayan enkesit" olarak sınıflandırılmıştır. Bu sonuç, kesitin belirli yüklenme koşullarında yerel burkulmaya karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir. Yani, kesit yapısal bütünlüğünü ve dayanıklılığını korumak adına gereken kriterleri karşılamaktadır. Bu analiz, kesitin tasarım sürecinin güvenilirliği ve kesitin potansiyel zayıf noktalarının belirlenmesi açısından önemli bir adımdır.

#### 3.5.2. Narinlik oranı sınırı

Elemanların aksel basınç altında maruz kaldığı gerilmelere yönelik değerlendirmeler, çelik yönetmeliğinin Bölüm 6 veya Bölüm 16 hükümleri uyarınca burkulma boyu ( $L_c=KL$ ) kullanılarak yapılır. Bu hesaplamada, narinlik oranı  $L_c/i \leq 200$  değerini aşmamalıdır.

Seçilen IPE 180 profilinin burkulma mukavemet değerleri ise Tablo 1'de bulunmaktadır. Bu değerler, elemanın burkulma davranışını ve mukavemetini belirlemekte önemlidir. Dolayısıyla, elemanın tasarımında bu değerler göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer hesaplanan  $L_c/i$  değeri 200'den küçükse, seçilen profil elemanın burkulma açısından güvenli bir performans sergilemesi beklenir. Bu analiz, yapısal sağlamlığın ve dayanıklılığın tasarım sürecinin temel bir parçasını oluşturur.

$$\lambda_x = L_{cx} / i_x = 2,828 / 0,0742 = 38,11 \leq 200 \quad (3)$$

$$\lambda_y = L_{cy} / i_y = 2,828 / 0,0206 = 137,28 \leq 200 \quad (4)$$

Narinlik oranı her iki eksen için de kritik değerinin altında olduğundan, yönetmeliğin 8.1.1 maddesine göre narinlik koşulu sağlanmıştır.

**Tablo 1.** IPE 180 profili ölçü ve mukavemet tablosu [20]

<b>IPE 180</b>			
	A	2390	mm <sup>2</sup>
	J	48100	mm <sup>4</sup>
	i <sub>x</sub>	74,2	mm
	i <sub>y</sub>	20,6	mm
	I <sub>x</sub>	13170000	mm <sup>4</sup>
	I <sub>y</sub>	1010000	mm <sup>4</sup>
	W <sub>px</sub>	166000	mm <sup>3</sup>
	W <sub>py</sub>	34600	mm <sup>3</sup>
	W <sub>ex</sub>	146000	mm <sup>3</sup>
	W <sub>ey</sub>	22200	mm <sup>3</sup>
	b	91	mm
	t <sub>f</sub>	8	mm
	t <sub>w</sub>	5,6	mm
	h	180	mm
h <sub>i</sub>	164	mm	
d	146	mm	

### 3.5.3 Karakteristik basınç kuvveti mukavemeti

Bu dayanım terimi, bir yapı elemanının eksenel basınç altında ne kadar yük taşıyabileceğini ifade eder. Elemanın narin olmayan kesiti için geçerli olan eksenel basınç kuvveti  $P_n$ , çelik yönetmeliğinin 8.2 maddesi dikkate alınarak hesaplanır.

Elemanın kritik yük sınırını tespit etmek için ise denklem (4) çözümlenir ve burkulma gerilmesi hesaplanır. Bu hesaplama, elemanın hangi yük seviyelerinde burkulmaya maruz kalabileceğini belirlemek açısından kritik öneme sahiptir.

Gerilme hesaplamasında, narinlik oranı yüksek olan eksen yönündeki değer tercih edilir çünkü bu durumda eleman daha dayanıklı bir davranış sergileme eğilimindedir. Bu detaylı analizler, elemanın taşıma kapasitesini anlamak, tasarımın güvenliğini sağlamak ve yapısal bütünlüğü korumak için hayati bir rol oynar.

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot 21 \times 10^7}{\left(\frac{2,828}{2,06 \times 10^{-2}}\right)^2} = 109517,5 \text{ kN/m}^2 \quad (5)$$

Burkulma gerilmesi ve kritik yükün hesaplanmasında denklem (6) kullanılarak koşul durumu aşağıdaki şekilde belirlenir. Kritik burkulma gerilmesi, narinlik oranı yüksek olan eksenin hesaplamalarına dahil edilerek hesaplanır.

$$\frac{L_c}{i_y} = \frac{2,828}{2,06 \times 10^{-2}} = 137,6 > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4,71 \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 114,55 \quad (6)$$

Denklem (6)'nın koşullu çözümü sonucunda kritik burkulma gerilmesi  $F_{cr}$ , hesaplanır. Bu hesaplama, elemanın belirli bir yük altında burkulma davranışını ve dayanıklılığını değerlendirmek için önemlidir.

$$F_{cr} = 0,877 F_e = 0,877 (109517,5) = 96046,9 \text{ kN/m}^2 \quad (7)$$

Karakteristik basınç kuvveti  $P_n$ , hesaplanan kritik burkulma gerilmesine bağlı olarak çözümlenir. Yüksek Değişkenlik Katsayısı Yöntemi (YDKT) çerçevesinde, karakteristik basınç kuvveti tasarım katsayısı ( $\Phi_c = 0.90$ ) ile çarpılarak tasarım kuvveti elde edilir. Bu yöntem, yapı elemanlarının dayanıklılığını ve tasarımını değerlendirmede kullanılan bir yaklaşımdır.

$$P_n = F_{cr} A_g = 96046,9 \times 23,9 \times 10^{-4} = 229,55 \text{ kN}$$

$$P_d = \Phi_c P_n = 0,9 \times 229,55 = 206,6 \text{ kN bulunur.}$$

$$\frac{P_u}{P_d} = \frac{117,45}{206,6} = 0,57 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı  $\leq 1$  olduğundan çubuk yükü güvenle taşır.

### 3.6. Kesme kuvveti etkisi altındaki çubuğun tasarım kontrolü

Çubuk eleman, kesme kuvvetine maruz kaldığında, taşıma kapasitesi azalır ve kırılma riski artar. Bu nedenle çelik kubbe sistemlerinin tasarımında, çubuk elemanların kesme kuvvetlerine karşı direncinin hesaplanması ve tasarımının buna göre gerçekleştirilmesi son derece önemlidir. ÇYTHYE-2018'in Bölüm 10'u çelik elemanların kesme kuvveti etkisi altındaki tasarımını ele alır.

Özellikle çift simetri eksenli I kesitli elemanlar için, yönetmeliğin 10.2.1 maddelerine göre tasarım yapılır. Kesme kuvveti sınırını belirlemek için denklem (8) kullanılır. Elemanın taşıdığı kesme kuvveti, bu sınır değerden küçük olmalıdır; aksi halde kesit büyütülmesi veya malzeme sınıfının iyileştirilmesi gibi adımlar atılmalıdır. Bu tasarım aşaması, çubuk elemanın kesme yüklemesine karşı dayanıklılığını ve güvenliğini sağlamayı amaçlayan kritik bir adımdır.

$$V_n = 0,6 F_y A_w C_{v1} \quad (8)$$

Burada;

“ $A_w$ ” gövde kesit alanı ( $=h t_w$ ), “ $C_{v1}$ ” gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı

$$V_n = 0,6 (355 \times 10^3)(0,954 \times 10^{-3})(1,0) = 203,202 \text{ kN bulunur.}$$

YDKT çerçevesinde, karakteristik kesme kuvveti, tasarım katsayısı ( $\Phi_v = 1.0$ ) ile çarpılarak tasarım kesme kuvveti elde edilir. Bu yöntem, yapı elemanlarının kesme yüklemelerine karşı dayanıklılığını ve tasarımını belirlemek için kullanılan bir yaklaşımdır.

$$V_d = V_n \Phi_v = 203,202 (1,0) = 203,202$$

$$\frac{V_u}{V_d} = \frac{1,714}{203,202} = 0,0084 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı  $\leq 1$  olduğundan çubuk yükü güvenle taşır

### 3.7. Moment etkisi altındaki çubuğun tasarımı

Moment etkisi altındaki bir çelik elemanın tasarımı, elemanın maruz kaldığı gerilme seviyelerinin belirlenmesi ve elemanın eğilme momentine karşı direnme kapasitesinin hesaplanmasını içerir. Bu tasarım sürecinde, elemanın kesit boyutları, geometrisi ve malzeme özellikleri gibi faktörler, gerilme seviyelerini ve direnç kapasitesini etkileyen önemli unsurlardır.

Çelik yapı elemanları, elastik davranış göstermeleri hedeflenir. Bu, elemanın eğilme momenti etkisi ortadan kaldırıldığında orijinal şekline geri dönebileceği anlamına gelir. Ancak, elemanın elastik sınırları aşıldığında, yani gerilme seviyesi belirli bir eşik değerinin üzerine çıktığında, eleman plastik hale gelir ve kalıcı şekil değişiklikleri oluşur. Tasarımın temel prensiplerinden biri, elemanın akma sınırı altında kalacak şekilde kesitin belirlenmesidir. Model sisteminin en kritik elemanı, Şekil 14'te gösterildiği gibi eğilme momentine maruz kalır. Bu elemanın tasarımı, ÇYTHYE-2018 koşulları göz önünde bulundurularak kontrol edilir. Eğilme momentine karşı dayanma kapasitesi bu tasarım aşamasında belirlenir. Eğilme momenti altındaki elemanların tasarımı, ÇYTHYE-2018'in

bölüm 9 kurallarına göre gerçekleştirilir. Bu aşamada elemanın güvenli ve dayanıklı bir şekilde eğilme momentine karşı direnme kapasitesi sağlanmış olur.

### 3.7.1. Yerel burkulma için enkesit sınıflandırılması

Eğilme momentinin basınç bileşeni etkisine maruz kalan eleman kesitleri için, yerel burkulma sınır koşulları; kompakt, kompakt olmayan ve narin enkesit olmak üzere üç farklı durumda incelenir. Bu koşullar, elemanın burkulma dayanıklılığını etkileyen önemli faktörleri değerlendirmek amacıyla belirlenir.

Yerel burkulma sınır değeri olan  $\lambda$ , en az bir kesit parçası için  $\lambda_p$  sınır değerini aşmadığı durumda "kompakt enkesit" olarak kabul edilir. Yerel burkulma sınır değeri olan  $\lambda$ ,  $\lambda_p$  sınır değerini aşırsa da  $\lambda_r$  değerini aşmadığında "kompakt olmayan enkesit" olarak sınıflandırılır.  $\lambda$  değeri,  $\lambda_r$  değerini aştığı durumda ise kesit "narin enkesit" olarak adlandırılır. Bu sınıflandırmalar, elemanın kesit yapısının ve geometrisinin burkulma davranışını anlamak ve tasarlamak açısından kritik bir rol oynar.

Seçilen tasarım, çift simetri eksenli IPE-180 profilinin eğilme momentinin basınç bileşeni etkisine maruz kalan başlık ve gövde parçaları için yapılmıştır. Yerel burkulma kontrolü, denklem (9) ve (10) kullanılarak gerçekleştirilir. Bu denklemler, elemanın burkulma davranışının ve dayanıklılığının analiz edilmesinde kullanılır. Başlık parçası için (Tablo 5.1B, Durum 10 )

$$\lambda = \frac{b}{2t_w} = \frac{45,5}{5,3} = 8,58 < \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 9,24 \quad (9)$$

Gövde parçası için (Tablo 5.1B, Durum 15 )

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{146}{5,3} = 27,55 < \lambda_r = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 91,45 \quad (10)$$

$\lambda$  değeri,  $\lambda_p$  değerinden küçük olduğundan dolayı, yerel burkulma "kompakt enkesit" olarak sınıflandırılır. Çift simetri eksenli I kesitli elemanlar için, kuvvetli eksen etrafındaki eğilme etkisi altında kesit parçaları "kompakt" olarak sınıflandırılır. Bu durumda, yönetmeliğin bölüm 9.2'sinde belirtilen sınır değerlere göre hesaplama yapılmalıdır. Bu bölümde, akma sınır durumu ve yanal burulmalı burkulma sınır durumu kontrol edilmelidir. İki durumun koşullarına göre, daha küçük olan moment, kapasite dayanımı için kabul edilecektir. Bu tasarım yaklaşımı, elemanın kuvvetli ekseninde maruz kaldığı eğilme etkisinin dayanıklılığını ve güvenliğini sağlamayı amaçlar.

### 3.7.2. Plastik eğilme momenti sınır durumu

Eğilme momenti etkisi altında eleman kesitinde meydana gelen akma sınır moment değeri, denklem (11) kullanılarak hesaplanmıştır. Yönetmeliğin gereklilikleri doğrultusunda birleşik etkiler dikkate alınacak ve bu nedenle kiriş üzerindeki moment etkisi hem güçlü ekseninde (M 3-3) hem de zayıf eksen (M 2-2) yönlerinde hesaplanacaktır. Bu yöntem, elemanın kesitindeki akma sınır moment değerinin ve dolayısıyla dayanıklılığının hem güçlü ekseninde hem de zayıf ekseninde gerçek dünya etkilerini yansıtacak şekilde hesaplanmasını amaçlar.

$$M_n = M_p = F_y W_p \quad (11)$$

Güçlü ekseninde plastik gerilme momenti:

$$M_{nx} = M_{px} = F_y W_{px} = 355 \times 0,166 = 58,93 \text{ kN.m}$$

Zayıf ekseninde plastik gerilme momenti:

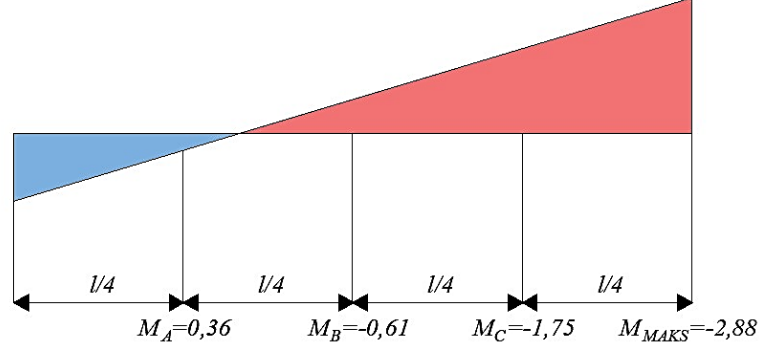
$$M_{ny} = M_{py} = F_y W_{py} = 355 \times 0,0346 = 12,28 \text{ kN.m}$$

### 3.7.3. Güçlü eksen etrafında yanal burulmalı burkulma sınır durumu

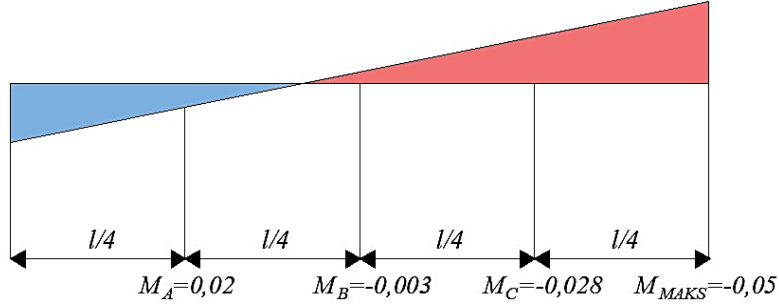
Plastik eğilme sınır durumunda olduğu gibi, bu durum için de kiriş üzerindeki moment etkisi hem güçlü ekseninde (M 3-3) hem de zayıf eksen (M 2-2) yönünde hesaplanacaktır. Kritik elemanın güçlü ekseninde oluşturduğu



moment diyagramı Şekil 15'te, zayıf eksende oluşturduğu moment diyagramı ise Şekil 16'da gösterilmiştir. Bu hesaplamalar, elemanın plastik davranışını ve dayanıklılığını anlamak için önemlidir ve tasarım sürecinin güvenli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine yardımcı olur.



Şekil 15. Kritik elemanın güçlü ekseninde (M 3-3) oluşturduğu moment diyagramı [17]



Şekil 16. Kritik elemanın zayıf ekseninde (M 2-2) oluşturduğu moment diyagramı [17]

Yönetmelik 9.2.2 gereği, yanal burkulma momenti sınır durumu için, enkesit başlığının desteklenmeyen uzunluğu olan L<sub>b</sub>'ye bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, elemanın yanal burkulma davranışını analiz etmek ve dayanıklılığını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Elemanın sınır uzunlukları, denklem (12) ve (13) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemler, elemanın taşıma kapasitesini belirlemek için kullanılır ve tasarım sürecinin güvenliğini sağlamak amacıyla önemlidir.

$$L_p = 1,76i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (12)$$

$$L_r = 1,95 i_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{W_{ex} h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex} h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \quad (13)$$

Burada;

“C” burulma sabiti, “L<sub>b</sub>” eğilme momenti altında kalan ve stabilite bağlantılarıyla desteklenmesi yapılmayan eleman uzunluğu, “L<sub>p</sub>” akma sınır durumu için uzunluk, “L<sub>r</sub>” elastik olmayan yanal burulmalı burkulma sınır uzunluğudur.

L<sub>r</sub> olarak bilinen elastik olmayan yanal burulmalı burkulma sınır uzunluğunun hesaplamasında, kullanılacak etkin atalet yarıçapı, denklem (14)'te bulunmuştur.



$$i_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{d t_w}{b_f t_f}\right)}} = \frac{91}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{146,5,3}{91 \cdot 8}\right)}} = 0,0242 \text{ m} \quad (14)$$

$$L_p = (1,76)(0,0206) \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 0,88 \text{ m}$$

$L_r$  hesabında kullanılacak olan burulma sabiti "C", çift simetri eksenine sahip I enkesitleri için ÇYTHYE-2018 gerekliliklerine göre  $C=1.0$  olarak belirlenir. Bu bağlamda,

$$L_r = 0,95 (0,0242) \frac{21 \times 10^7}{0,7(355 \times 10^3)} \times \sqrt{\frac{4,81 \times 10^{-8} \times 1}{1,46 \times 10^{-4} \times 0,172} + \sqrt{\left(\frac{4,81 \times 10^{-8} \times 1}{1,46 \times 10^{-4} \times 0,172}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7(355 \times 10^3)}{21 \times 10^7}\right)^2}}$$

$L_r = 2,97 \text{ m}$  bulunur.

Yönetmelik 9.22 (b) hükmüne göre, elemanın sınır uzunlukları şu şekildedir:  $L_p=0,88 \text{ m} < L_b=2,828 \text{ m} \leq L_r=2,97 \text{ m}$ . Bu aralık içinde olduğu için karakteristik eğilme momenti mukavemeti hesaplaması, denklem (15) kullanılarak yapılacaktır. Bu hesaplama, elemanın eğilme davranışını değerlendirerek tasarım sürecinin dayanıklılık ve güvenlik yönünden uygunluğunu sağlamayı amaçlar.

$$M_n = c_b \left[ M_p - (M_p - 0,7F_y W_{ex}) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \quad (15)$$

Eğilme momenti hesabında kullanılacak burulma sabiti, denklem (16)'ya göre hesaplanır. Bu denklem, elemanın kesit özellikleri ve geometrisi doğrultusunda burulma dayanıklılığını belirlemek için kullanılır. Moment değerleri, bu hesaplamalar sırasında kullanılacak olan kritik parametrelerdir. Bu değerler, Şekil 16'da görsel olarak sunulmuştur ve tasarım sürecinde elemanın eğilme davranışını analiz etmek için önemlidir.

$$C_b = \frac{12,5M_{maks}}{2,5M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (16)$$

$$C_b = \frac{12,5(2,88)}{2,5(2,88) + 3(0,36) + 4(0,61) + 3(1,75)} = 2,25$$

$$M_n = 2,25 \left[ 58,93 - (58,93 - 0,7(355)(0,146)) \left( \frac{2,83 - 0,88}{2,97 - 0,88} \right) \right] = 85,05 > M_p$$

Güvenlik sağlamak amacıyla, hesaplanan akma ve burulmalı burkulma momentlerinden daha küçük olan bir tasarım momenti seçilir. Bu nedenle, tasarım sürecinde  $M_n=M_p=58,93 \text{ kN.m}$  değeri tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, elemanın taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını garanti altına alarak yapılan bir tasarım stratejisini yansıtır. YDKT çerçevesinde, karakteristik eğilme momenti, tasarım katsayısı ( $\Phi_c = 0.90$ ) ile çarpılarak tasarım momenti elde edilir. Bu yöntem, elemanın eğilme yüklemelerine karşı dayanıklılığını ve tasarımını belirlemek için kullanılan bir yaklaşımdır. Karakteristik eğilme momenti, yapı elemanının mukavemetini temsil ederken, tasarım katsayısı güvenlik ve yük değişkenliği gibi faktörleri dikkate alarak tasarımın güvenliğini sağlar.

$$M_d = \Phi_b M_n = 0,9 \times 58,93 = 53,037 \text{ kN.m}$$

$$\frac{M_u}{M_d} = \frac{2,883}{53,037} = 0,054 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı  $\leq 1$  olduğundan çubuk yükü güvenle taşır

### 3.7.4. Zayıf eksen etrafında yanıl burulmalı burkulma sınır durumu

Zayıf eksen üzerinde oluşan moment değerleri Şekil 16'da görsel olarak sunulmuştur. Zayıf eksen yönünde oluşan eğilme momenti sınır hesabı için, ilk olarak sınır uzunluklarına göre moment değeri belirlenir. Bu bağlamda, denklem (12) ve (13) çözümlenerek elemanın sınır uzunlukları durumuna bağlı olarak moment değeri hesaplanmıştır. Bu adımlar, elemanın zayıf eksen yönündeki eğilme davranışını analiz etmek ve dayanıklılığını sağlamak amacıyla gerçekleştirilir.

$$L_p = (1,76)(0,07423) \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 3,18 \text{ m}$$

$$L_r = 0,95 (0,0242) \frac{21 \times 10^7}{0,7(355 \times 10^3)} \dots$$

$$\times \sqrt{\frac{4,81 \times 10^{-8} \times 1}{2,2 \times 10^{-5} \times 0,172} + \sqrt{\left(\frac{4,81 \times 10^{-8} \times 1}{2,2 \times 10^{-5} \times 0,172}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7(355 \times 10^3)}{21 \times 10^7}\right)^2}} = 3,1 \text{ m}$$

Yönetmelik 9.22 (a) hükmüne göre elemanın sınır uzunlukları şu şekildedir:  $L_b = 2,828 < L_p$ . Bu durumda, karakteristik eğilme momenti mukavemeti hesaplamasında burulmalı burkulma sınır durumunun dikkate alınmasına gerek yoktur. Bu nedenle, tasarım sürecinde zayıf eksen akma sınır durumu için hesaplanmış olan değer kullanılmıştır. Bu yaklaşım, elemanın tasarımını daha basit ve güvenli bir şekilde gerçekleştirmeyi amaçlar.

YDKT yöntemine göre, karakteristik eğilme momenti tasarım katsayısı ( $\Phi_b = 0.90$ ) ile çarpılarak tasarım momenti elde edilir.

$M_d = \Phi_b M_n = 0,9 \times 12,28 = 11,052 \text{ kN.m}$  bulunur.

$$\frac{M_u}{M_d} = \frac{0,05}{11,52} = 0,0047 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı  $\leq 1$  olduğundan çubuk yükü güvenle taşır

### 3.8. Birleşik yük etkisi altındaki çubuğun tasarım kontrolü

Burulma etkisi olup olmadığına bakılmaksızın, eleman üzerinde meydana gelen eksenel kuvvet ve eğilme moment etkisinin birleşik olarak ele alındığı tasarım türüdür. Bu tasarım, Yönetmelik bölüm 11'de belirtilen kurallar ve sınırlamalar dikkate alınarak gerçekleştirilir. Kritik çubuk elemanı için, eğilme momenti ve eksenel basınç etkisi birlikte göz önünde bulundurularak, Yönetmelik bölüm 11.2'ye uygun olarak hesaplamalar yapılır.

Bu çerçevede, çift simetri eksenli olan elemanlarda, eksenel basınç ve eğilme momenti etkilerinin birleşik olarak incelenmesi durumunda, denklem (17) kurallarına göre birleşik etki etkileşim sınırlaması yapılacaktır. Bu adımlar, elemanın farklı yüklemeler altındaki davranışını analiz etmek ve tasarımının güvenli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla atılır.

$$\frac{P_r}{P_c} \geq 0,2 \quad \text{için} \quad \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{P_r}{P_c} < 0,2 \quad \text{için} \quad \frac{P_r}{2P_c} + \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (17)$$

$$\frac{P_r}{P_c} = \frac{117,447}{206,6} = 0,57 \geq 0,2 \quad \text{bulunur.}$$

Denklem (17) için 1. durum uygun olduğu göz önüne alındığında, bu oranla birleşik yük tesiri altındaki elemanın etki/kapasite oranı birleşik etkileşim hesaplaması için hesaplanır.

$$\frac{117,447}{206,6} + \frac{8}{9} \left( \frac{2,883}{53,037} + \frac{0,05}{11,052} \right) = 0,658 \leq 1$$

Yönetmelik gerekliliklerine göre, kritik çubuk elemanı birleşik etki altındayken yükü etki/kapasite oranına uygun bir şekilde güvenle taşımaktadır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Modelin kubbe geometrisi, yapının farklı bölgelerinde ve yük durumlarına bağlı olarak çeşitli gerilme koşullarını beraberinde getirir. Bu, kubbenin tasarım ve dayanıklılık açısından ilişkili olduğunu göstermektedir. Etek bölgelerinde, genellikle çekme gerilmeleri oluşur. Ancak, bu çekme gerilmeleri kubbenin simetrisine ve yük dağılımına bağlı olarak değişebilir. Özellikle simetrik yükler altında, çember kirişlerinin etek bölgelerinde aynı değerlerde çekme gerilmelerine maruz kaldığını görürüz. Ancak tepe noktasına yaklaştıkça, bu çekme gerilmeleri azalırken basınç gerilmeleri artar. En yüksek basınç gerilimi, genellikle çember kirişlerinin tepe noktasında meydana gelir. Bununla birlikte, asimetrik yükler veya düzensiz yük dağılımları altında, çubuk elemanları yük durumuna bağlı olarak hem çekme hem de basınç gerilmelerine maruz kalabilirler. Bu nedenle, çubuk elemanlarının tasarımı sırasında her çubuk elemanı için çekme ve basınç gerilmelerini dikkate alınması gerekmektedir. Radyal kirişler, simetrik yükler altında radyal olarak simetrik gerilmelere neden olur. Ancak yükün dağılımına bağlı olarak bu gerilmeler farklılık gösterebilir. Tepe noktasına doğru ilerledikçe, basınç gerilimi etkisi azalır. Ancak asimetrik yükler altında, her bir radyal kiriş farklı gerilme koşullarına maruz kalabilir. Bu, radyal kirişlerin tasarımında her bir elemanın çekme ve basınç gerilmelerini ayrıntılı bir şekilde analiz etmeyi ve tasarlamayı gerektirir. Yapının stabilitesi ve dayanıklılığı açısından, her bir radyal kirişin yük durumuna bağlı olarak çekme ve basınç gerilmelerine uygun dayanımı sağlaması büyük önem taşır.

Tüm bu faktörler, Model'in kubbe geometrisi ve yük koşullarına bağlı olarak farklı gerilme koşullarına maruz kalacağını gösterir. Bu bilgiler, yapısal analiz ve tasarım süreçlerinde büyük bir rol oynamakta ve Model kubbenin stabilitesini, dayanıklılığını ve yapısal gereksinimlerini karşılamasına yardımcı olmaktadır. Yapının başarılı bir şekilde tasarlanması, bu karmaşık gerilme koşullarını hesaba katmayı gerektirir ve bu da mühendislerin ve tasarımcıların detaylı bir analiz ve dikkatli bir planlama yapmalarını zorunlu kılar. Bu çalışmanın sonuçları, tek katmanlı çelik kubbe modelinin analiz ve tasarımının başarılı bir şekilde tamamlandığını ve yapısal hesaplamaların doğru bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Kubbenin geometrisi, tek katmanlı yapısı ve farklı yük koşullarına bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Tasarım sürecinde, çekme ve basınç gerilmelerine uygun elemanların seçilmesi, sistemin güvenliği için hayati öneme sahiptir.

Kubbe modelinin yapısal gereksinimleri karşılayarak güvenlik ve dayanıklılık sağlaması, bu çalışmanın önemli bir başarısıdır. Ayrıca, SAP2000 programı kullanılarak AISC 360-10 yönetmeliğine göre tasarlanan kesitlerin ÇYTHYE-2018'e göre kontrol edildiği belirtilmiştir. Tablo 2 ve Tablo 3 ile sunulan veriler, zayıf eksen etrafında moment altındaki çubuk boyutlandırma kontrolünün ve birleşik yük etkisi altında gerilme kontrolünün aynı veya çok benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu da yapı güvenliğinin sağlandığını ve iki farklı yönetmeliğin benzer sonuçlar elde ettiğini göstermektedir. Kubbe modelinin güvenli ve dayanıklı bir şekilde tasarlanması, yapıların uzun ömürlü olmasını ve insanların güvende kalmasını sağlar. Ayrıca, farklı yönetmeliklere göre yapılan tasarımların benzer sonuçlar vermesi, uluslararası standartların ve güvenlik gereksinimlerinin önemini gösterir.

**Tablo 2.** Kritik Elemanın Zayıf Eksendeki Moment Altında Boyutlandırma Kontrolü [17]

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYE-2018'e göre Manuel Hesap (kN)
<b>Etki Momenti, <math>M_u</math></b>	0,052	0,052
<b>Plastik Eğilme Momenti, <math>M_p</math></b>	12,28	12,28
<b>Yanal Burulmalı Burkulma Momenti, <math>M_n</math></b>	-	-
<b>Tasarım Kapasite Kuvveti, <math>M_d</math></b>	11,05	11,05
<b>Etki / Kapasite oranı</b>	0,045	0,047

**Tablo 3.** Kritik Elemanın Birleşik Yük Etkisi Altında Boyutlandırma Kontrolü [17]

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYE-2018'e göre Manuel Hesap (kN)
<b>Etki kuvveti, <math>P_u</math></b>	117,445	117,445
<b>Tasarım Kapasite Kuvveti, <math>P_d</math></b>	195,06	206,59
<b><math>P_r/P_c</math></b>	-	0,57
<b>(<math>M_{3-3}</math>) Etki Momenti, <math>M_u</math></b>	2,883	2,883
<b>(<math>M_{3-3}</math>) Tasarım Kapasite Kuvveti, <math>M_d</math></b>	53,037	53,04
<b>(<math>M_{2-2}</math>) Etki Momenti, <math>M_u</math></b>	0,052	0,052
<b>(<math>M_{2-2}</math>) Tasarım Kapasite Kuvveti, <math>M_d</math></b>	11,05	11,05
<b>Birleşik Yük Etkisinde Etki/Kapasite Oranı</b>	0,655	0,658

Bu çalışma, inşaat ve yapı mühendisleri, mimarlar, yapısal analiz ve tasarım uzmanları için faydalı bilgiler içermektedir. Ayrıca, çift katmanlı kubbe sistemleri veya benzer yapısal sistemlerin analizi ve tasarımıyla ilgilenen araştırmacılar, akademisyenler ve öğrenciler de bu çalışmadan yararlanabilirler. Bu çalışmanın sonuçları, yapı mühendisliği projelerinde daha güvenli ve dayanıklı tasarımlar yapma amacı güden profesyonellere ve tasarımcılara rehberlik edebilir. Ayrıca, yapısal analiz ve tasarım süreçlerinde kullanılacak önemli bir kaynak olarak kullanılabilir.

### Kaynaklar

- [1] TS EN 1991-1-3, Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1-3: Genel etkiler, kar yükleri, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2009.
- [2] TS EN 1991-1-4, Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1-4: Genel etkiler - rüzgâr etkileri, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2005.
- [3] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018.
- [4] Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018.
- [5] AISC 360-10, Specification for Structural Steel Buildings, Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [6] Timoshenko SP, Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells, Singapore: McGraw-Hill, 1959.
- [7] Timoshenko SP. Theory of Elastic Stability, New York: McGraw-Hill Book Co. Inc, 1961.
- [8] Papadopoulos CM, LoRicco MT. «Symmetry-adapted computation: A case study of the Bucharest dome,» %1 içinde *In Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, Montreal, Canada, 2006.
- [9] Soykan K. Çelik uzay kubbe sisemlerin ağırlıkça optimum dizaynı, (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi: Konya, 2007.
- [10] Çiftçi C. Stability of steel dome structures, (Yüksek lisans tezi). Boğaziçi Üniversitesi: İstanbul, 2009.
- [11] Karabulut U. Geniş açıklıklı uzay kafes sistemlerin ilgili türk ve avrupa standartları uyarınca karşılaştırmalı olarak incelenmesi, (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi: Trabzon, 2018.
- [12] Kara T. Tek tabakalı kubbelerin taşıyıcı sistemlerinin yönetmelikler açısından değerlendirilmesi, (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi: İstanbul, 2019.
- [13] Özcan M. Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde çapraz eleman kullanımının tasarıma etkisinin belirlenmesi, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2019.

- [14] Yılmaz G. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerde Berkitme Elemanı Kullanımının Tasarıma Etkisinin Belirlenmesi, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2021.
- [15] Adnanoğlu A. Farklı açıklıklara sahip dolu gövdeli kubbe kafes sistemler ile dairesel boşluklu kubbe kafes sistemlerin tasarım ve maliyet karşılaştırılması, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2022.
- [16] Wang F, Jiang G. «Numerical Investigations of Wind Loads on Spherical Structures with Various Types of Configurations,» *Buildings*, pp. 12(11), 1832, 2022.
- [17] Bektaş MA. Çelik Uzay Kafes Kubbe Sistemlerinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Türk Çelik Yapılar Tasarım Yönetmeliğine Göre Analiz ve Tasarımı, Dicle Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).Diyarbakır, 2023.
- [18] Glenn AH. «Snap-Through Instability Patterns in Truss Structures,» %1 içinde *In 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 12th*, 2010.
- [19] Li Y, Xu YL. «Tuning and switching of band gap of the periodically undulated beam by the snap through buckling,» *AIP Advances*, p. 7(5), 2017.
- [20] BS EN 10365, Hot Rolled Steel Channels, I and H Sections. Dimensions and Masses, Brüksel: European Committee for Standardization, 2017.